

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos na simulação e, em seguida, será feita uma comparação dos mesmos com o resultado experimental.

5.1. Resultados das Análises do Modelo Numérico

Os resultados da análise numérica serão apresentados separadamente para cada tipo de ensaio, conforme indicado no item 4.3.

5.1.1. Resultados Obtidos na Condição de Tela Centralizada

A simulação realizada para condição de tela centralizada adotou, devido à sua simetria, somente $\frac{1}{4}$ do modelo original, no intuito de reduzir o número de equações a serem resolvidas pelo programa. Para visualização do modelo completo, foi utilizado o espelhamento do restante do mesmo.

Foram analisadas as seguintes variáveis: deslocamento vertical e horizontal; deformação vertical e horizontal; tensão vertical e horizontal; tensão principal máxima e mínima. Também foi analisada a deformação plástica equivalente, que nada mais é do que uma norma de medida de plastificação adotada pelo Abaqus.

A figura 59 apresenta o modelo na condição de tela centralizada antes da aplicação das tensões e a figura 60 mostra com detalhe os pontos a serem avaliados.

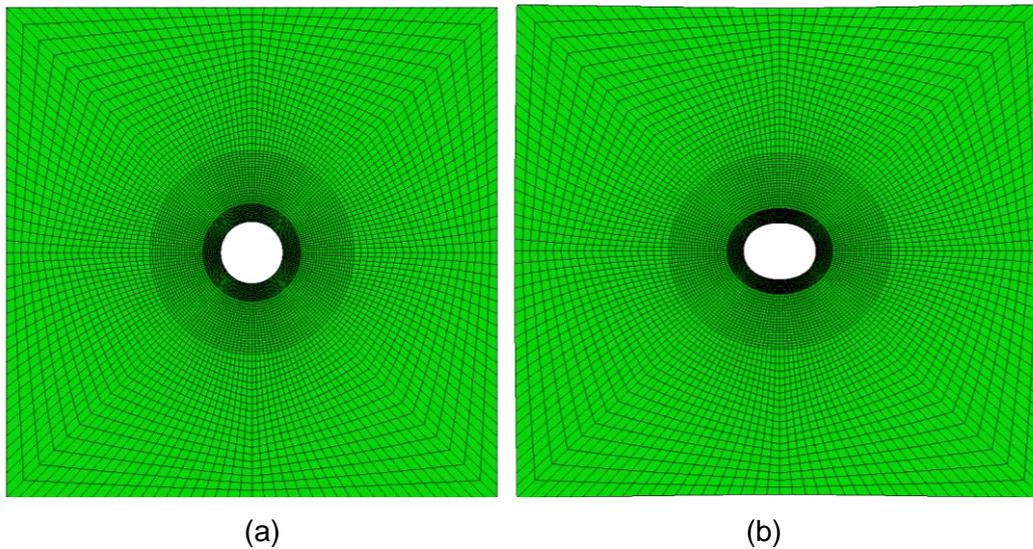


Figura 59 – Tela Centralizada: (a) Sem carregamento; (b) Ao final do carregamento (modelo distorcido em 20 vezes).

Para facilitar o entendimento e a visualização do comportamento da tela, a figura 60 (b) teve seu fator de escala aumentado em 20 vezes.

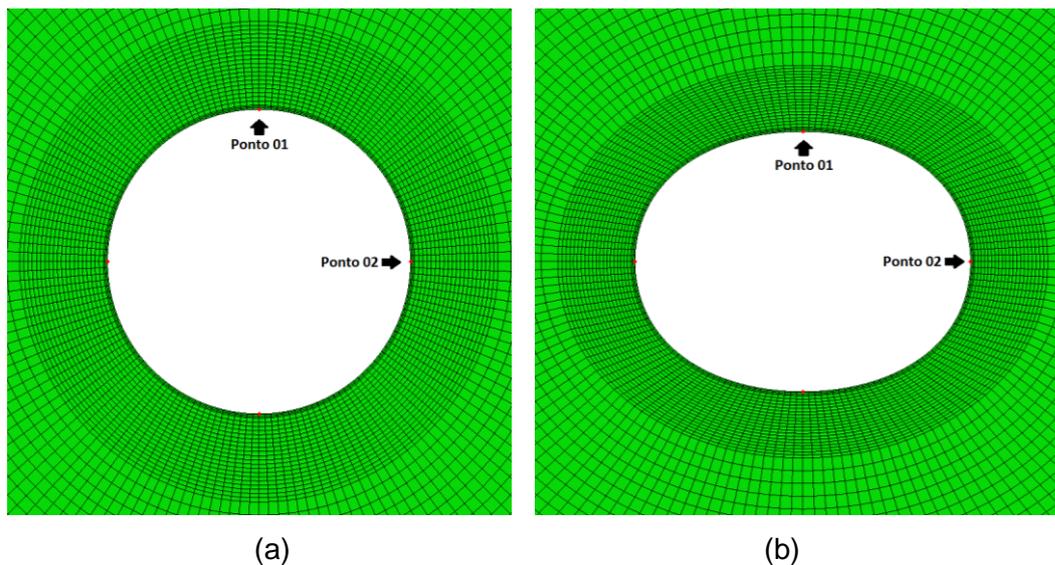


Figura 60 – Detalhe Tela Centralizada: (a) Sem carregamento; (b) Ao final do carregamento (modelo distorcido em 20 vezes).

Os deslocamentos verticais podem ser visualizados nas figuras 61 e 62. Devido à maior tensão aplicada verticalmente, o deslocamento no bordo superior do modelo (ponto 01) foi maior do que no bordo inferior do modelo simplificado (ou na zona central da figura 61), que em alguns pontos foi nulo. Esses deslocamentos verticais nulos podem ser explicados devido às condições de contorno adotadas na simulação, visto que para a simetria do modelo (1/4 do poço) foram colocadas restrições do deslocamento no eixo Y na borda inferior.

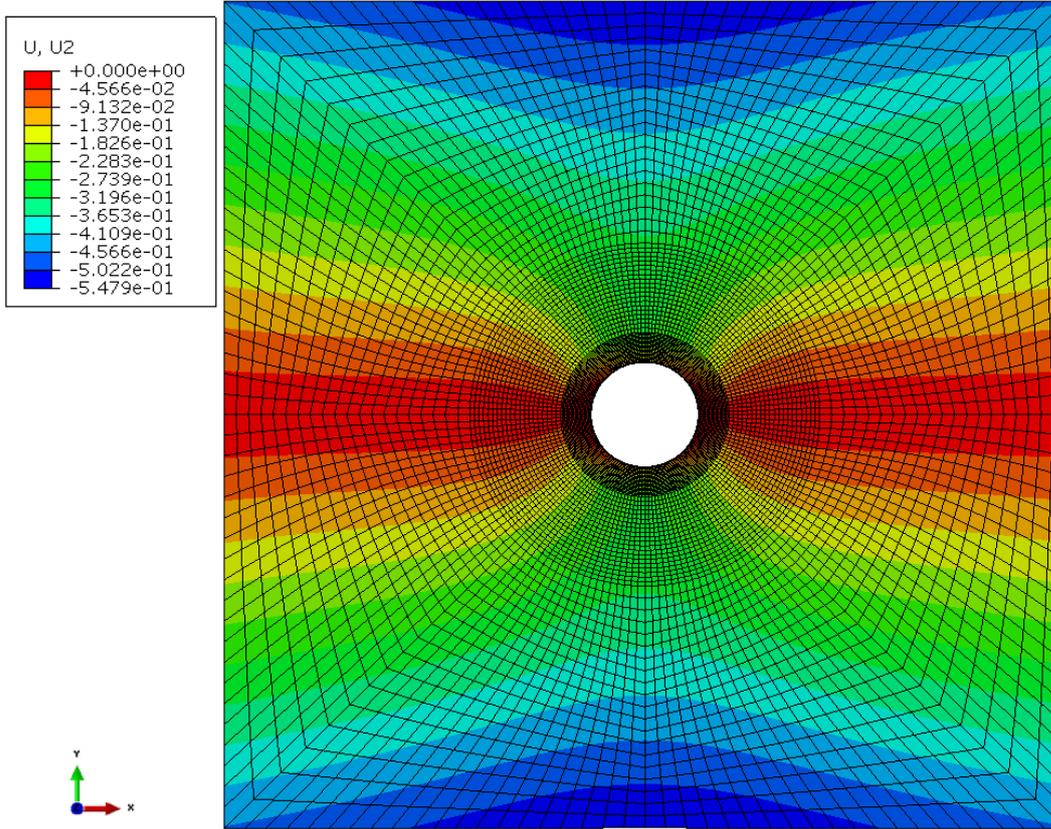


Figura 61 – Deslocamento vertical na condição de tela centralizada.

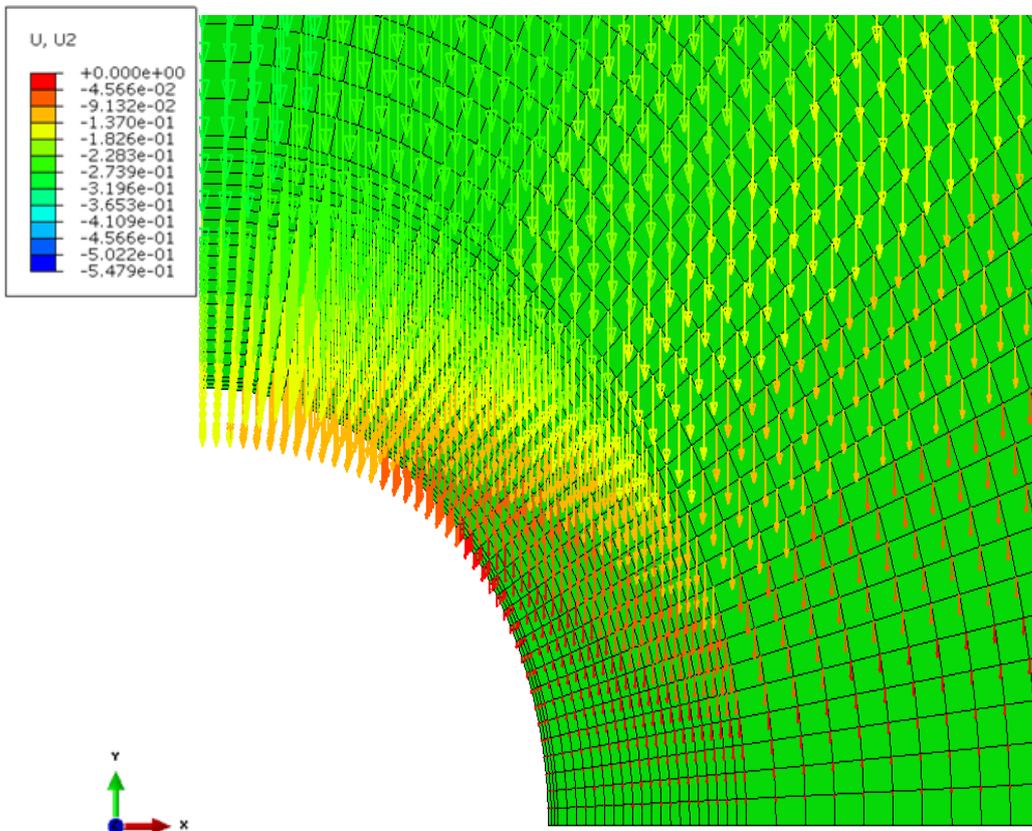


Figura 62 – Detalhe do deslocamento vertical na condição de tela centralizada (fator de aumento nas setas - 20 vezes).

Da mesma forma, os deslocamentos horizontais, que podem ser observados nas figura 63 e 64, apresentaram maiores valores na parede do poço (setas em vermelho).

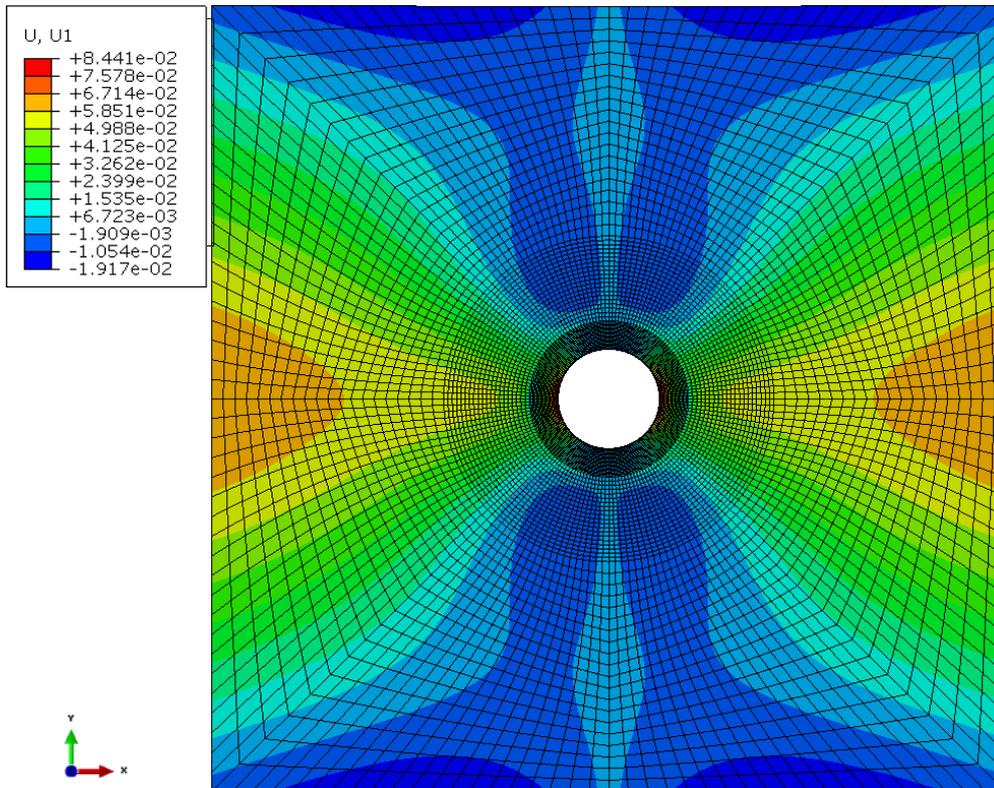


Figura 63 – Deslocamento horizontal na condição de tela centralizada.

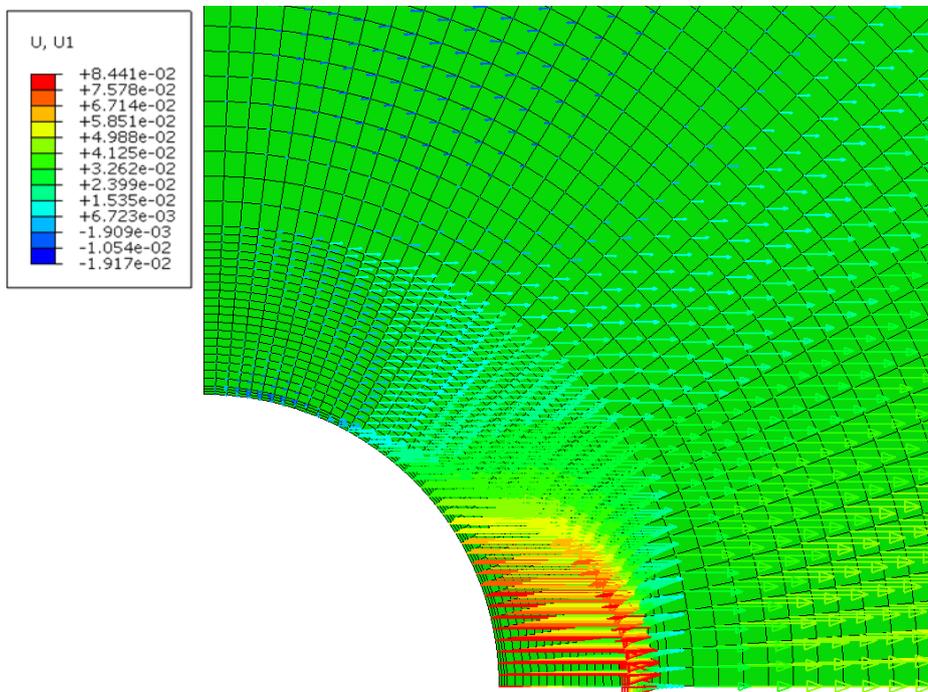


Figura 64 – Detalhe do deslocamento horizontal na condição de tela centralizada (fator de aumento nas setas - 20 vezes).

A figura 65 apresenta a variação do deslocamento nos pontos 01 e 02 em função do carregamento aplicado. O programa adota tensões de compressão como números negativos e tensões de tração como números positivos segundo a tabela 5, abaixo:

Tabela 5 – Convenção adotada pelo programa e pelo ensaio.

Convenção	Compressão	Tração
Abaqus	Negativo	Positivo
Experimental	Positivo	Negativo

É importante salientar que foram analisados os deslocamentos radiais no ponto 01 (valores do U2) e no ponto 02 (valores do U1), como apresentado na figura 60. Dado que o modelo físico mede o deslocamento em relação a cada eixo, os deslocamentos medidos em cada ponto foram multiplicados por dois para ficar de acordo com os dados obtidos por Chavez (2011).

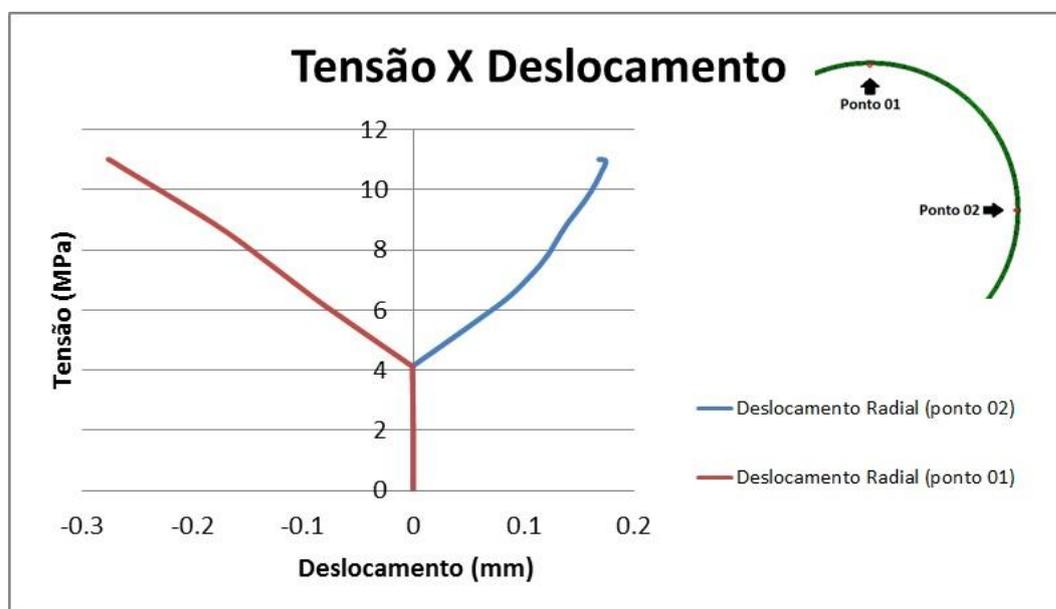


Figura 65 – Tensão (MPa) X Deslocamento radial (mm) – tela centralizada (convenção Abaqus).

Na figura 65, durante a primeira etapa do processo (confinamento), os deslocamentos radiais nos pontos analisados foram nulos ou próximos de zero. Isso pode ser justificado pelo comportamento do *gravel*, que é comprimido durante o confinamento e acaba suportando as tensões oriundas da formação.

A seguir são apresentados os resultados das deformações horizontais e verticais para condição de tela centralizada. Nas figuras 66 e 67, é possível observar maiores deformações no bordo inferior no contato formação/*gravel* destacado em vermelho.

Com relação aos resultados obtidos para deformação vertical, apresentados nas figura 68 e 69, nota-se maiores deformações na região

superior do *gravel*, causadas por maiores tensões verticais aplicadas, ou seja, o *gravel* tende a sofrer maiores deformações para suportar essa tensão.

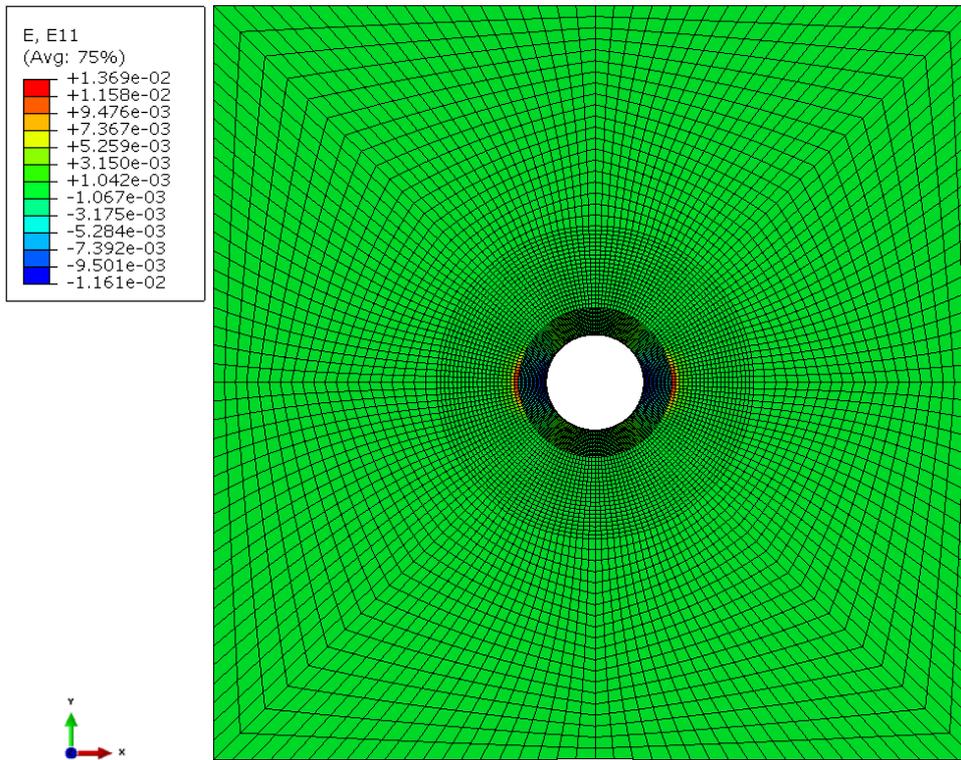


Figura 66 – Deformação horizontal na condição de tela centralizada.

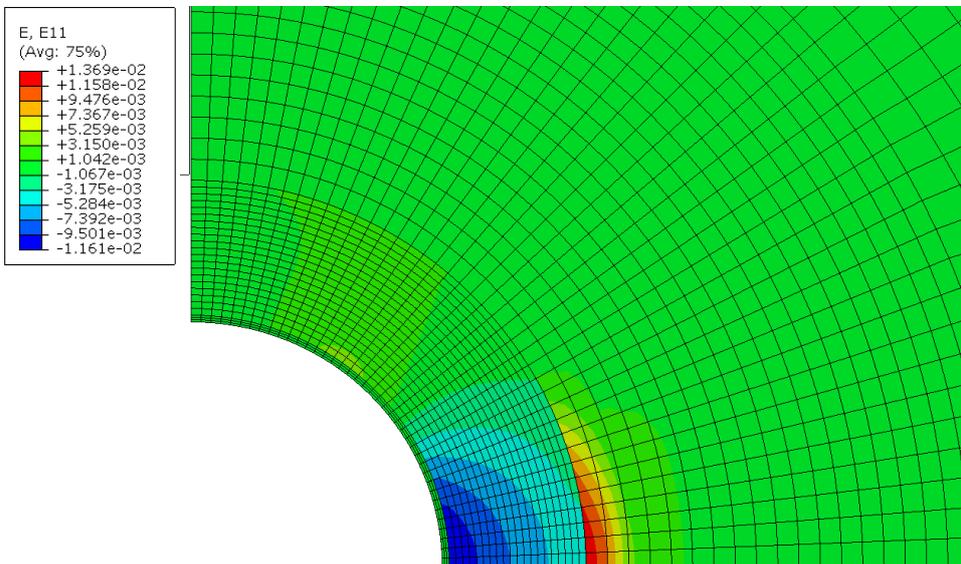


Figura 67 – Detalhe da deformação horizontal na condição de tela centralizada.

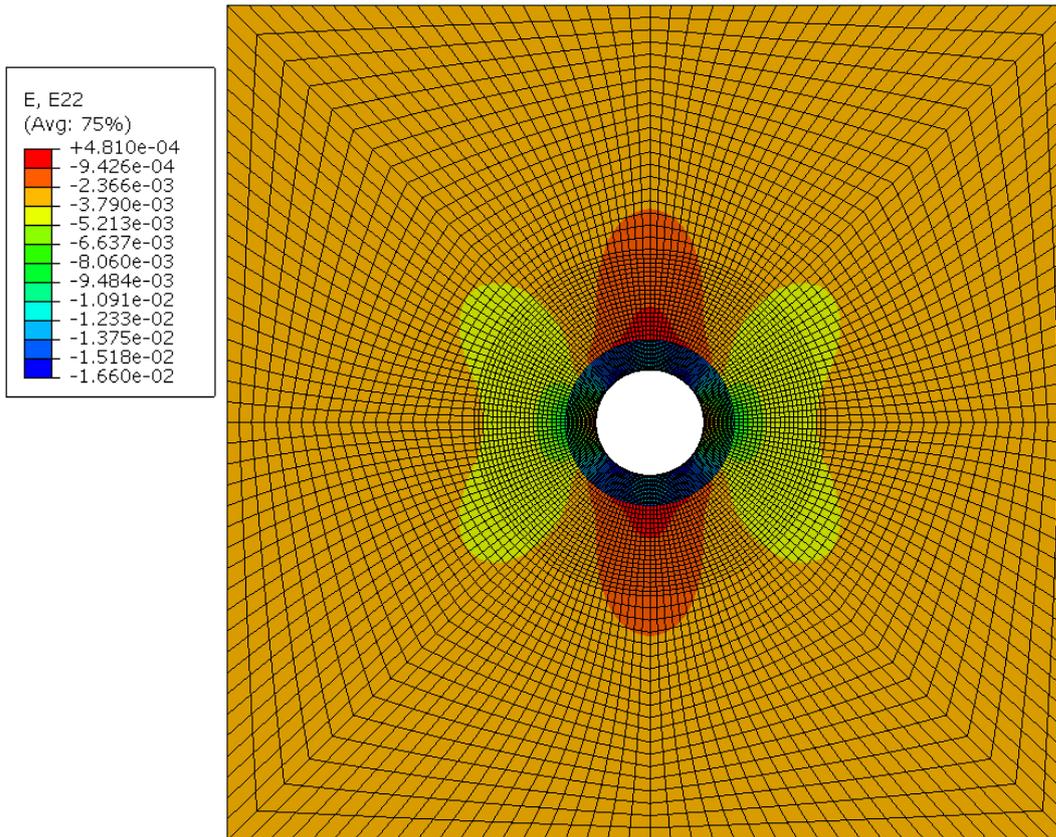


Figura 68 – Deformações verticais na condição de tela centralizada.

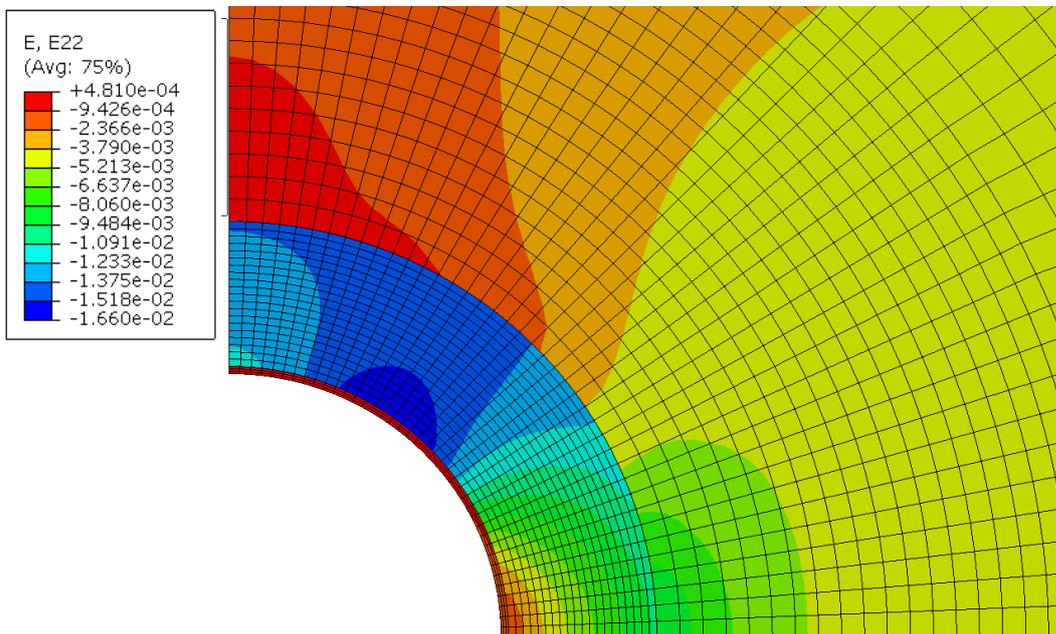


Figura 69 – Detalhe das deformações verticais na condição de tela centralizada.

É importante ressaltar que foram analisadas as deformações tangenciais nos pontos 01 e 02, como apresentado na figura 60. A figura 70 mostra a variação da deformação tangencial nos pontos 01 e 02 em função do carregamento aplicado.

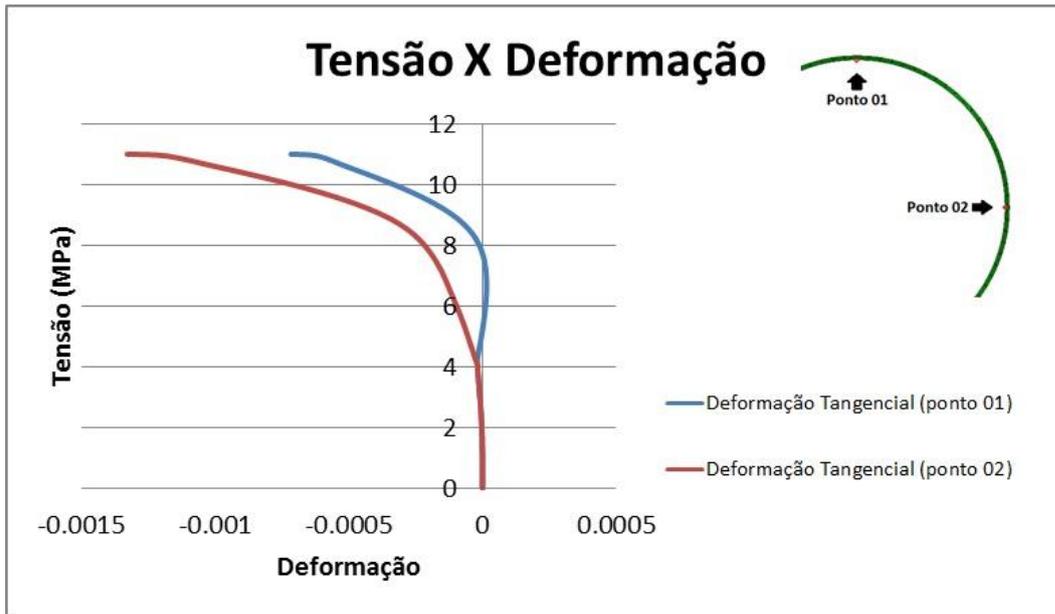


Figura 70 – Tensão (MPa) X Deformação Tangencial – tela centralizada (convenção Abaqus).

Como pode ser observado, durante a primeira etapa (confinamento - até 4,13 MPa), a deformação tangencial tanto no ponto 01 quanto no ponto 02 esteve próxima de zero. Após esta etapa, a deformação tangencial no ponto 01 apresentou valores muito próximos de zero até aproximadamente 7,58 MPa, chegando à deformação máxima de $-7,2 \times 10^{-4}$ enquanto a deformação tangencial no ponto 02 a 11,03 MPa ficou em $-1,3 \times 10^{-3}$. Logo, pode-se concluir que a tela sofre contração nos dois pontos analisados.

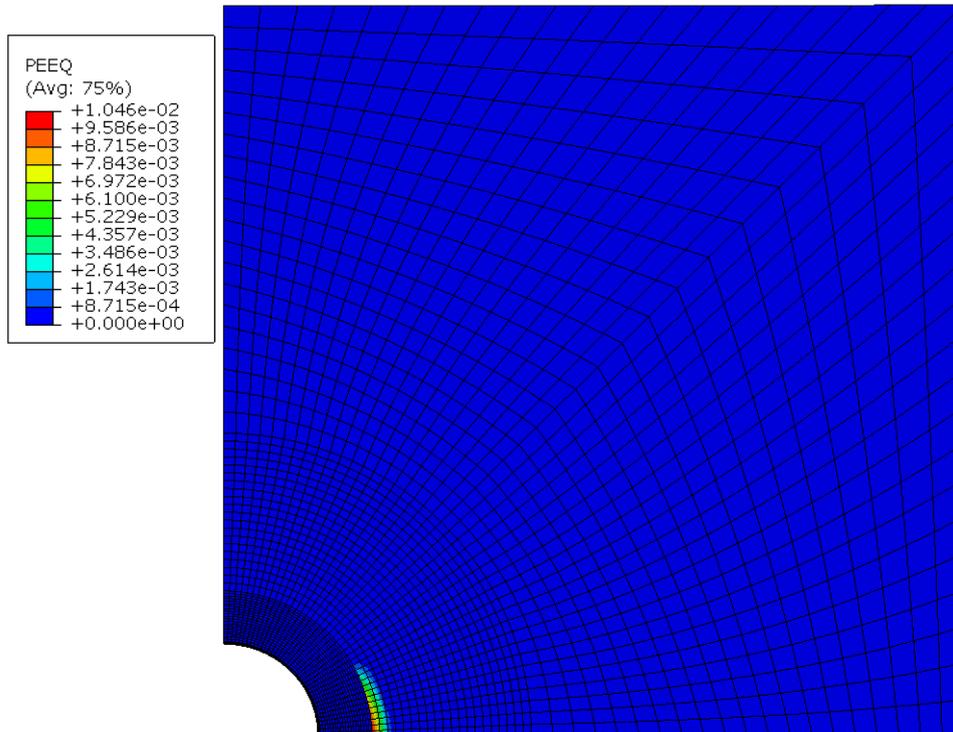


Figura 71 – Deformação plástica equivalente para condição de tela centralizada.

Os resultados apresentados na figura 71 são referentes à deformação plástica equivalente (PEEQ). Essa deformação é uma norma de medida utilizada pelo Abaqus e é determinada pela relação:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \int \frac{1}{c} \sigma : d\varepsilon^{pl} \quad (4.26)$$

A figura 73 mostra que o escoamento da formação ocorreu com uma tensão aplicada no topo do bloco de 6,48 MPa .

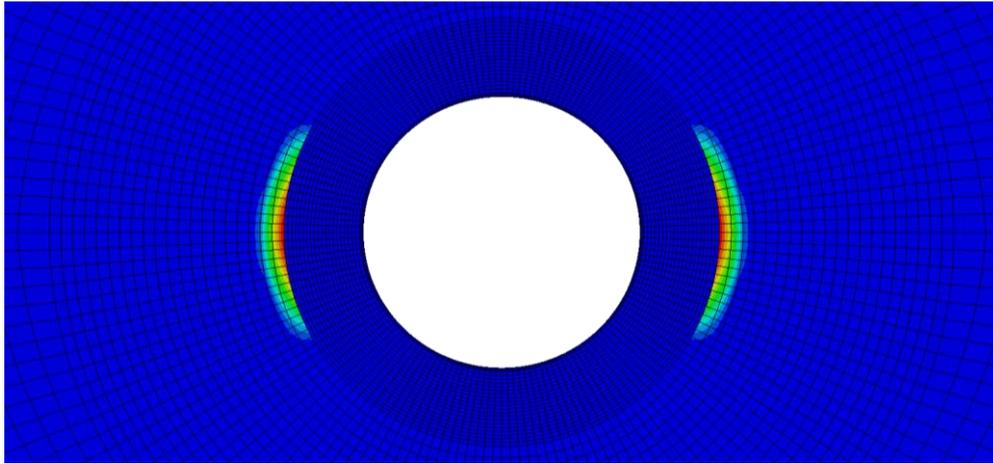


Figura 72 – Detalhe da deformação plástica equivalente na condição de tela centralizada.

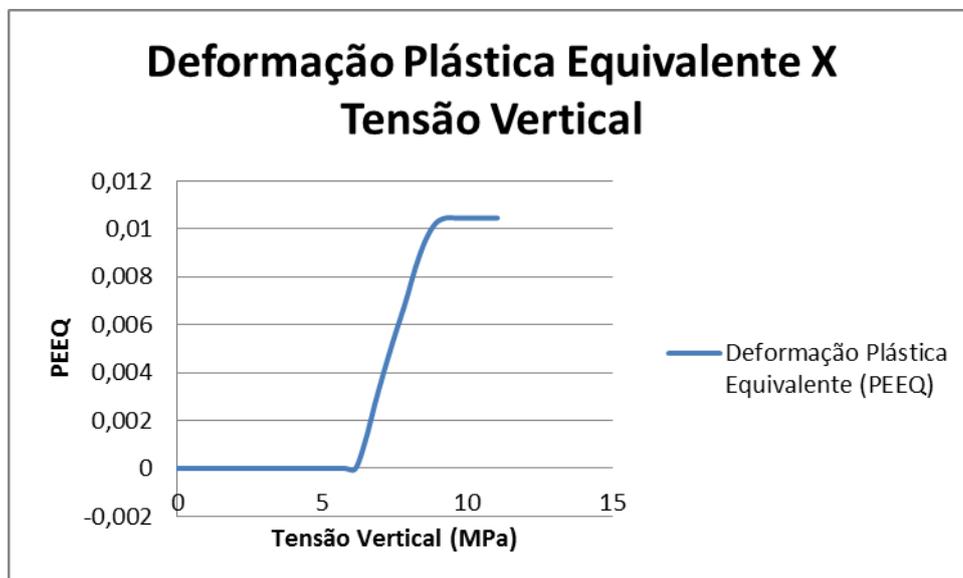


Figura 73 – Deformação Plástica Equivalente (PEEQ) X Tensão Vertical – tela centralizada.

Em seguida, são apresentados os resultados da distribuição das tensões máximas e mínimas principais na tela. Observa-se que as tensões máximas principais apresentaram valor máximo de -0,33 MPa (compressão) na parte interna da tela e mínimo de -2,84 MPa na parte externa da mesma (assinalado

na figura 74). Igualmente, na figura 75 observa-se que tensões principais mínimas estão concentradas no interior da tela, chegando a valores máximos de compressão de -72,6 MPa e mínimos de -136,8 MPa.

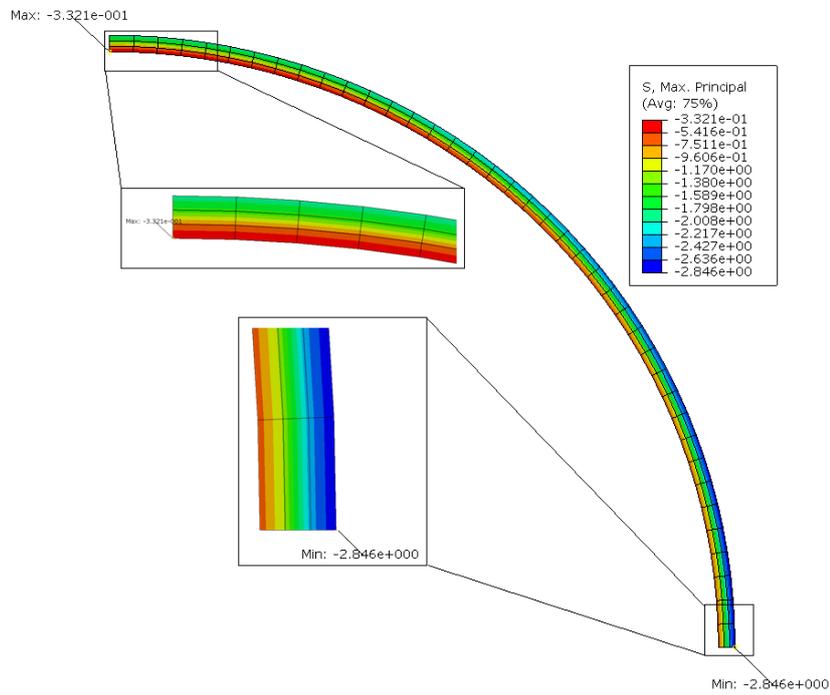


Figura 74 – Tensão máxima principal na condição de tela centralizada.

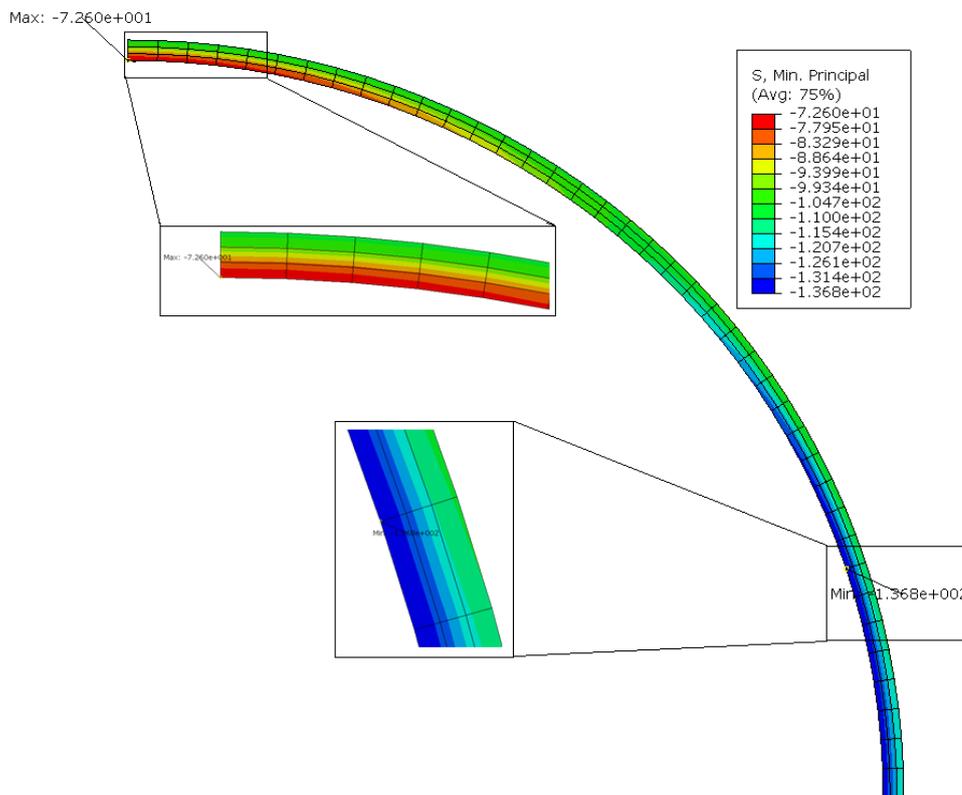


Figura 75 – Tensão mínima principal na condição de tela centralizada.

A variação da tensão radial ao longo do eixo AB, que inclui o sistema tela/gravel/formação, é apresentada na figura 76. Observa-se que existe um acréscimo de tensão radial na região do *gravel* e que as tensões se concentram no contato *gravel-formação*.

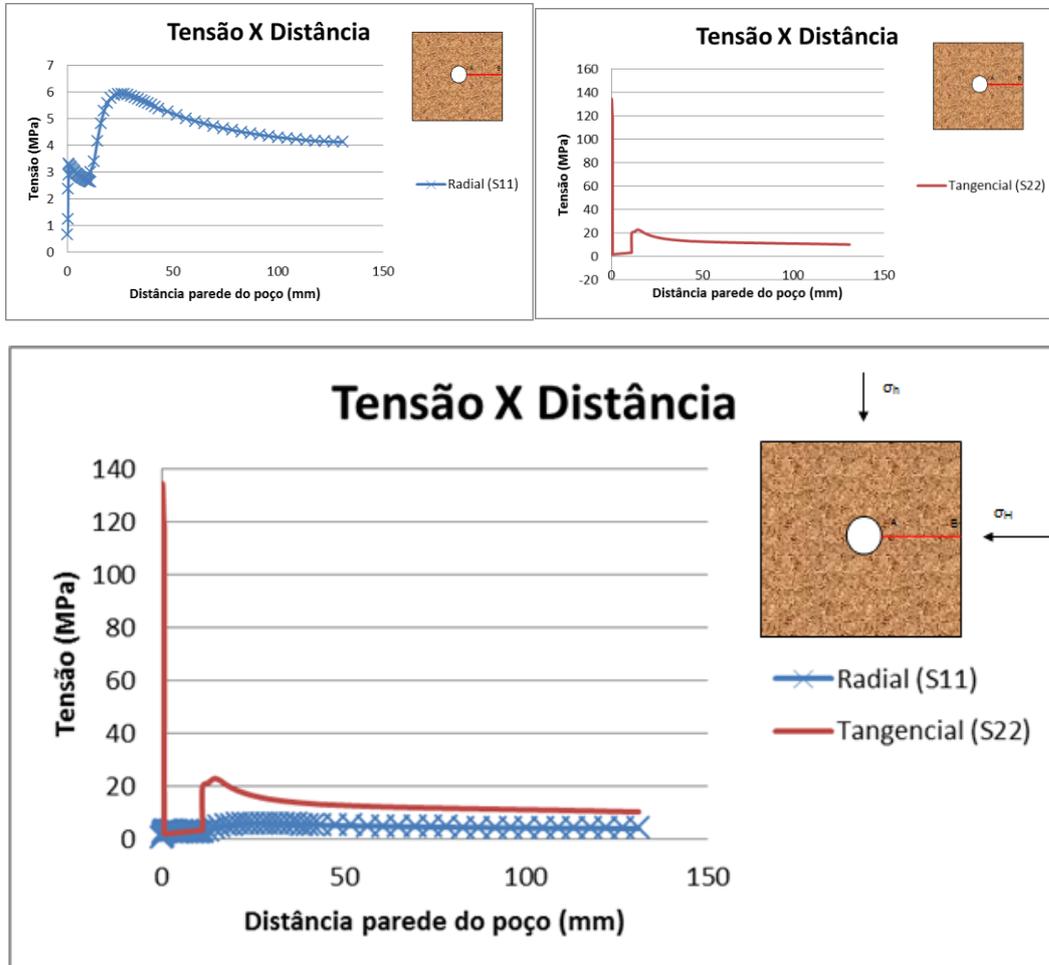


Figura 76 – Tensão Tangencial (MPa) X Distância da parede do poço – tela centralizada.

5.1.2.

Resultados Obtidos na Condição de Tela Encostada

A análise realizada para o modelo na condição de tela encostada adotou, como hipótese simplificadora, somente $\frac{1}{2}$ do modelo original, devido à simetria de sua geometria, reduzindo o número de equações a serem calculadas pelo Abaqus. A figura 77 apresenta o modelo antes e depois do carregamento. A visualização da figura 77 (b) está com seu fator de escala aumentado em 20 vezes.

Foram analisadas as seguintes variáveis: deslocamento vertical e horizontal; deformação vertical e horizontal; tensão vertical e horizontal; tensão

principal máxima e mínima. Também foi analisada a deformação plástica equivalente.

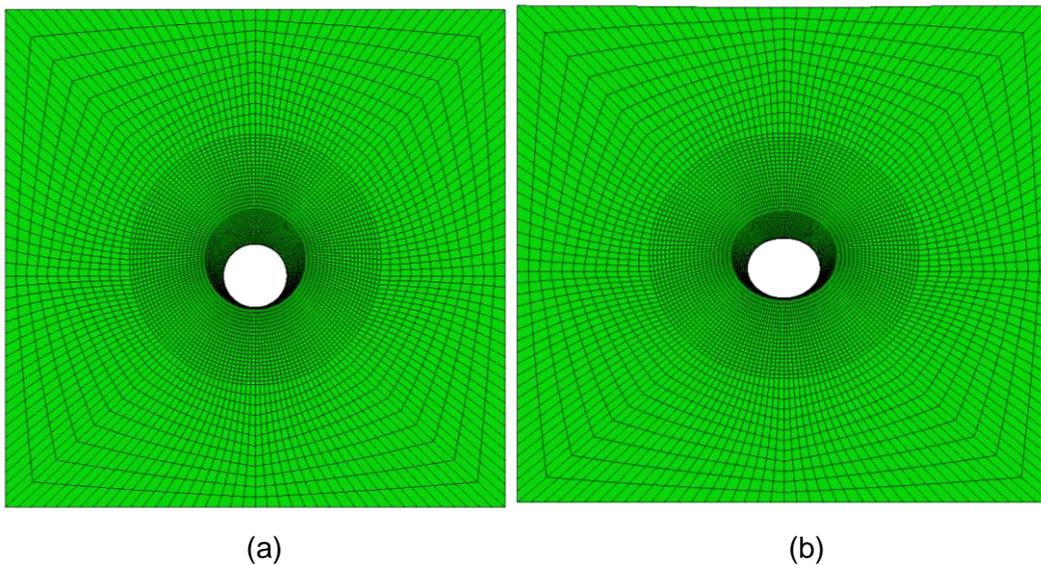


Figura 77 – Tela Encostada: (a) Sem carregamento; (b) Ao final do carregamento (modelo distorcido em 20 vezes).

A figura 78 (b) apresenta uma visualização ampliada do modelo. Percebe-se a mesma ovalização apresentada no modelo de tela centralizada.

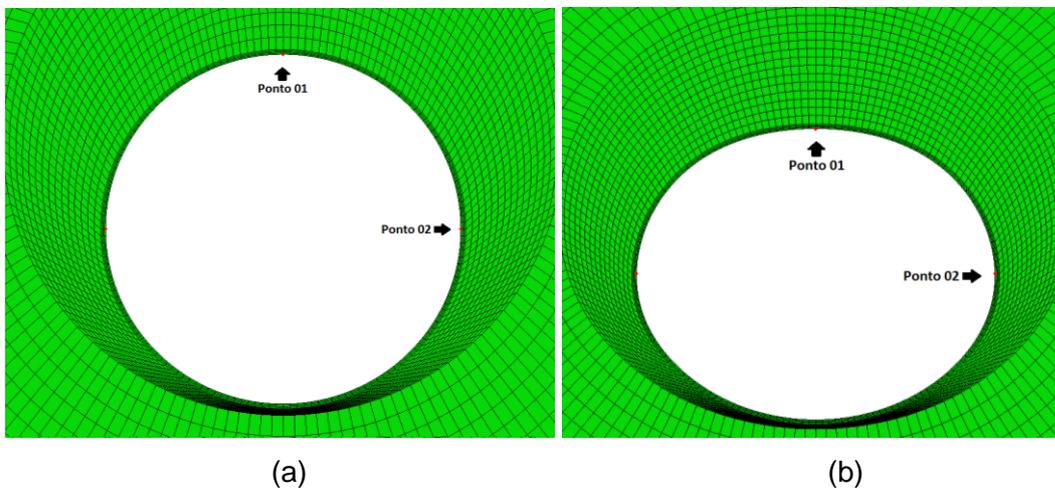


Figura 78 – Detalhe Tela Encostada: a) Sem carregamento; b) Ao final do carregamento (modelo distorcido em 20 vezes).

Os deslocamentos verticais podem ser vistos nas figuras 79 e 80. É importante salientar que as unidades apresentadas no resultado dos deslocamentos do modelo de tela encostada estão em metro.

Como esperado, devido à maior tensão aplicada na vertical, o deslocamento radial no bordo superior do modelo (ponto 01) foi maior do que no bordo inferior, causado pelas maiores tensões aplicadas verticalmente e pela

restrição do deslocamento no eixo Y no bordo inferior do modelo. Da mesma maneira, os deslocamentos horizontais, que podem ser observados nas figuras 81 e 82, apresentaram maiores valores na parede do poço (setas em vermelho no ponto 02). Percebe-se também que a formação desloca o *gravel* para a direção oposta ao deslocamento da tela no ponto 02.

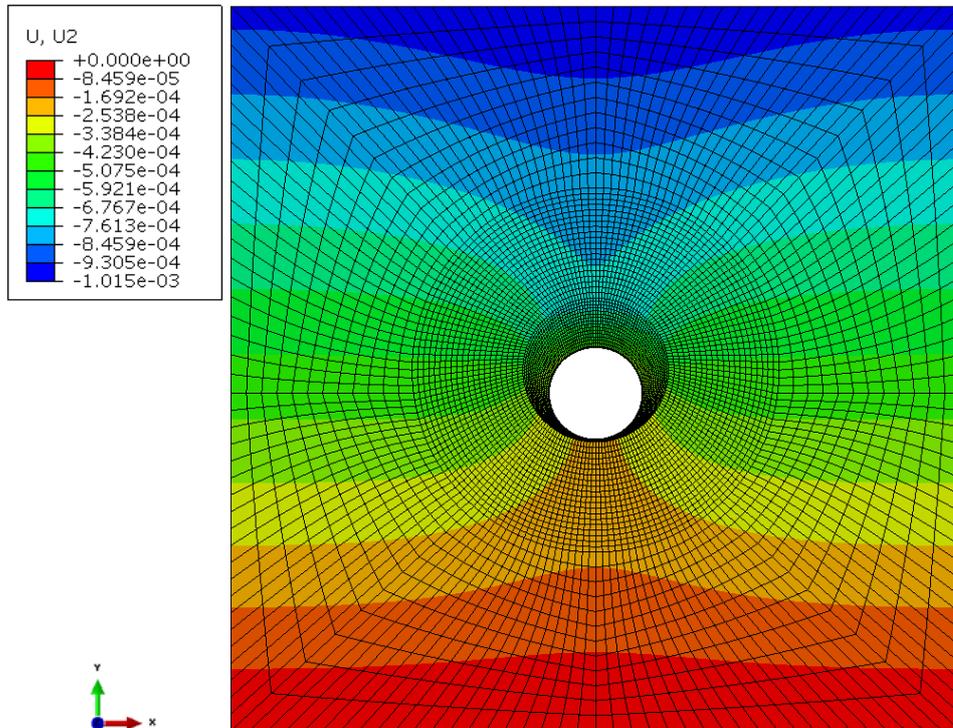


Figura 79 – Deslocamento vertical na condição de tela encostada.

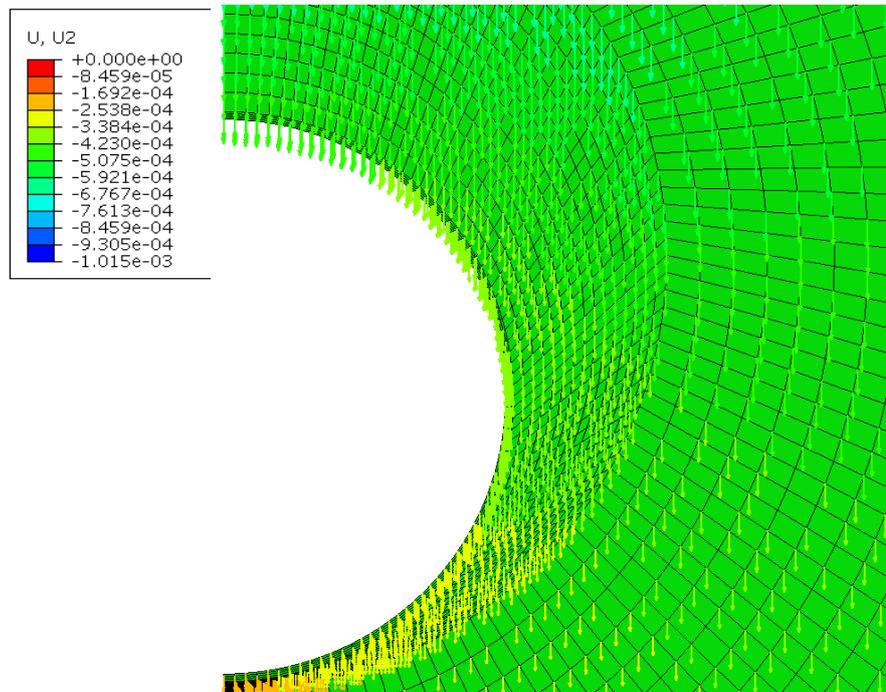


Figura 80 – Detalhe do deslocamento vertical na condição de tela encostada (fator de aumento nas setas - 20 vezes).

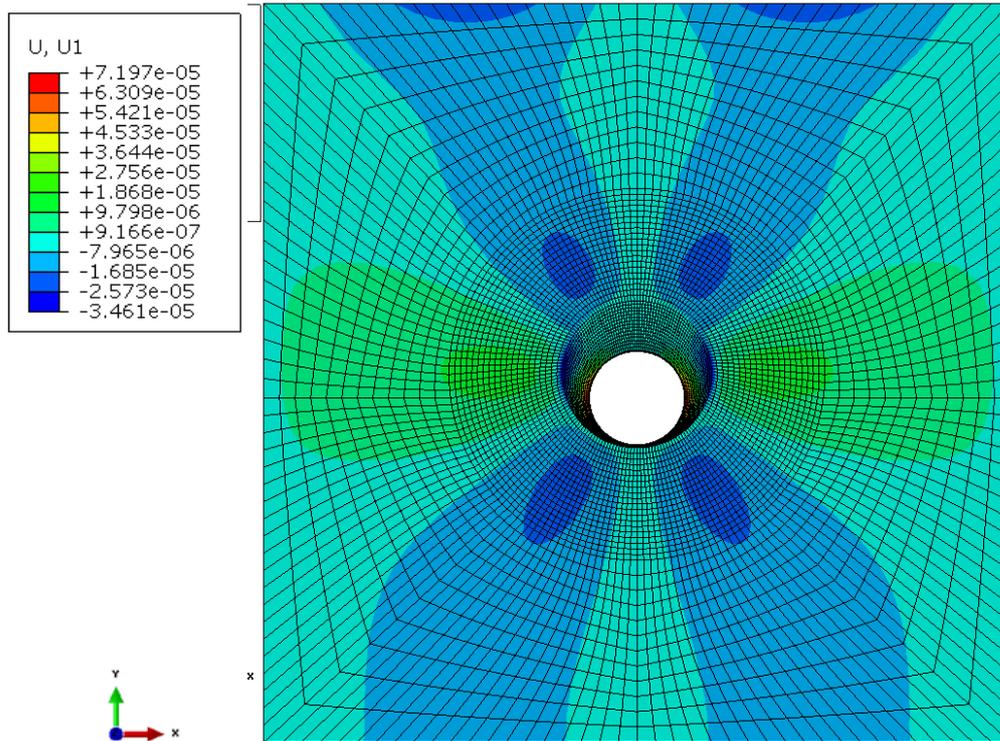


Figura 81 – Deslocamento horizontal na condição de tela encostada.

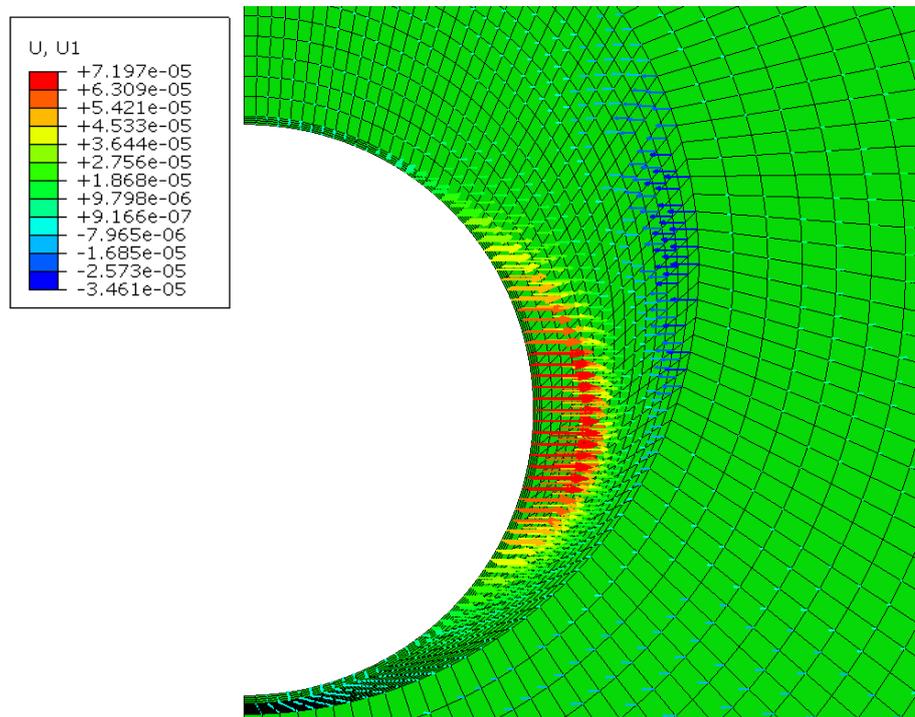


Figura 82 – Detalhe do deslocamento horizontal na condição de tela encostada (fator de aumento nas setas - 20 vezes).

Para validação do modelo, o que mais interessa são os deslocamentos que ocorrem na parede do poço. Logo, a figura 83 apresenta os resultados dos deslocamentos verticais e horizontais na parede do poço.

Nota-se que o deslocamento radial no ponto 02 chega a ser uma ordem de grandeza menor que o deslocamento radial no ponto 01. Esses resultados podem ser observados na figura 84.

É importante frisar ainda que os valores obtidos do deslocamento radial no ponto 01 tiveram que ser corrigidos, visto que o Abaqus mede o deslocamento de um nó em relação a seu eixo de origem. Durante a simulação, o furo do poço se deslocou alguns milímetros em relação ao eixo de origem, assim, foi considerado o deslocamento relativo entre os pontos opostos.

Vale lembrar que devido à simetria, o deslocamento radial no ponto 02 foi multiplicado por dois para comparação com o modelo físico.

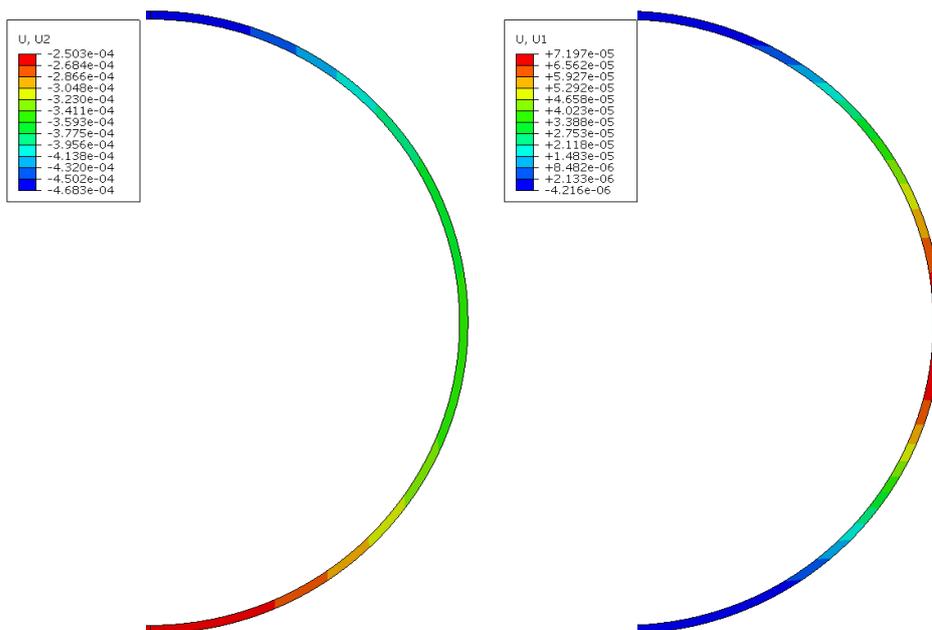


Figura 83 – Deslocamentos verticais e horizontais na tela para condição de tela encostada.

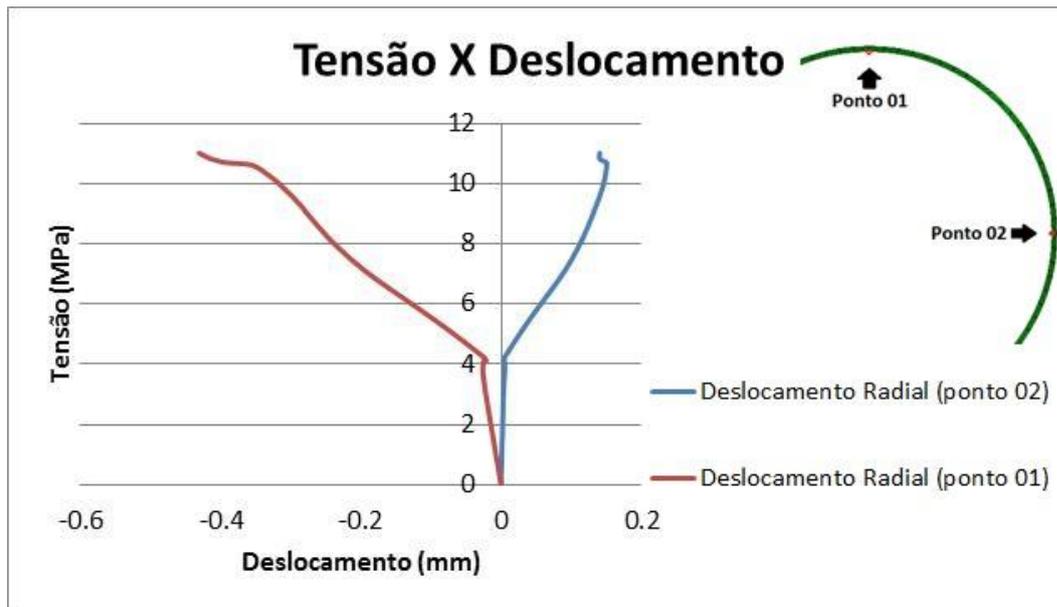


Figura 84 – Tensão (MPa) X Deslocamento Radial (mm) – tela encostada (convenção Abaqus).

Durante a primeira etapa (confinamento – até 4,13 MPa), apesar do deslocamento radial do ponto 02 ser nulo, o do ponto 01 apresentou um pequeno deslocamento, provavelmente devido à geometria do modelo. Ou seja, como a tela encontra-se encostada a formação, as tensões verticais terão maior influência no comportamento da mesma. Além disso, como comentado por Chavez (2011), o *gravel* tende a se depositar na região inferior entre a tela e a formação, provocando maiores tensões nesse ponto.

A seguir, são apresentados os resultados das deformações horizontais e verticais para tela encostada. Nas figuras 85 e 86, é possível observar a região do *gravel* que apresentou as maiores deformações.

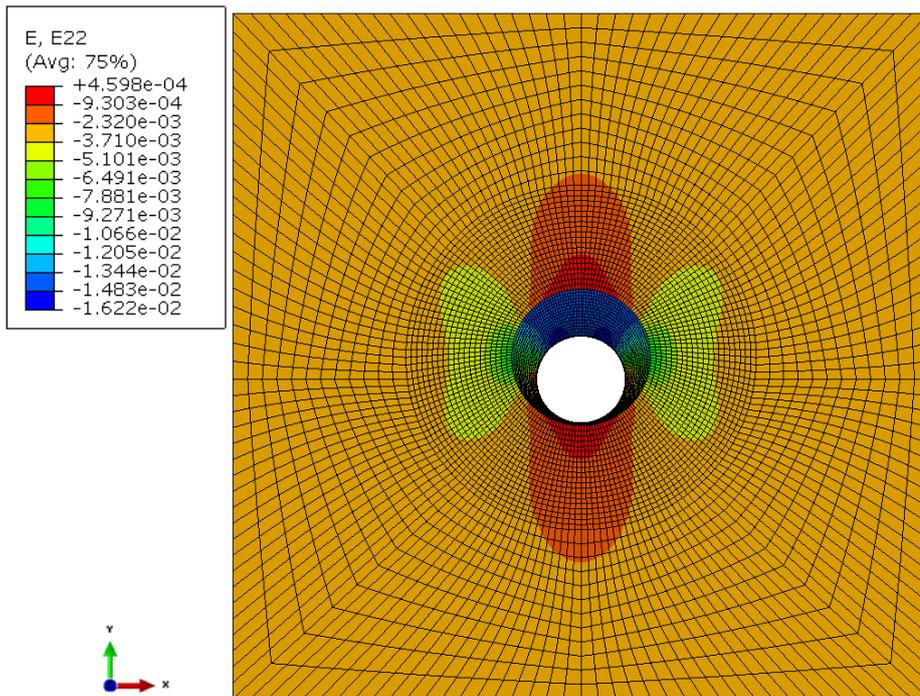


Figura 85 – Deformações verticais na condição de tela encostada.

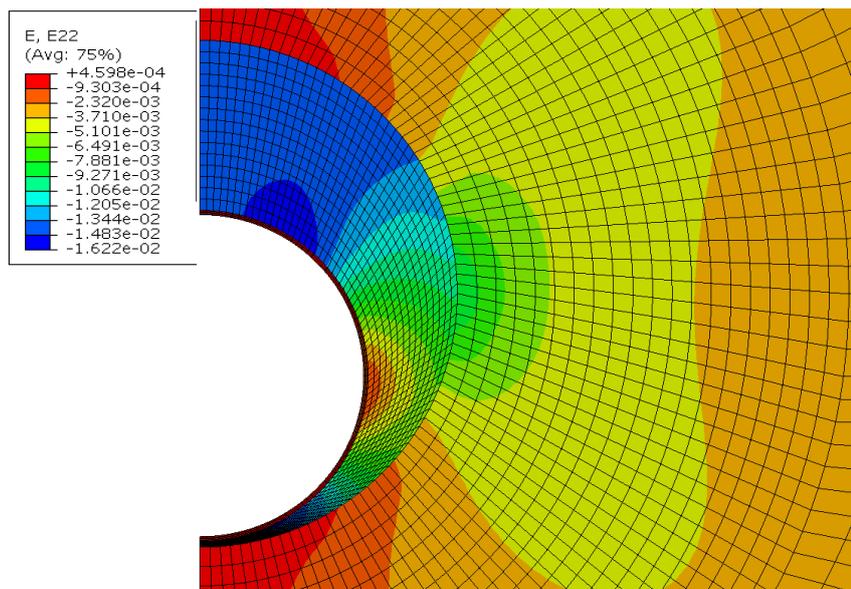


Figura 86 – Detalhe das deformações verticais na condição de tela encostada.

As deformações horizontais são apresentadas nas figuras 87 e 88. Nelas, nota-se a concentração dessas deformações próximas à parede do poço e nas regiões de contato.

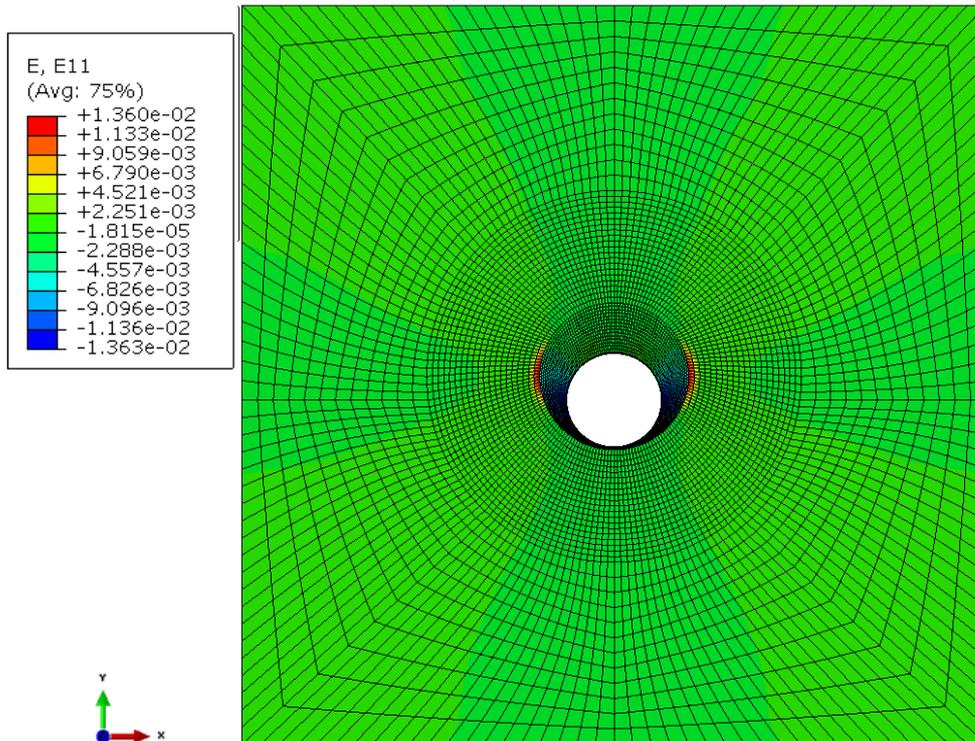


Figura 87 – Deformações horizontais na condição de tela encostada.

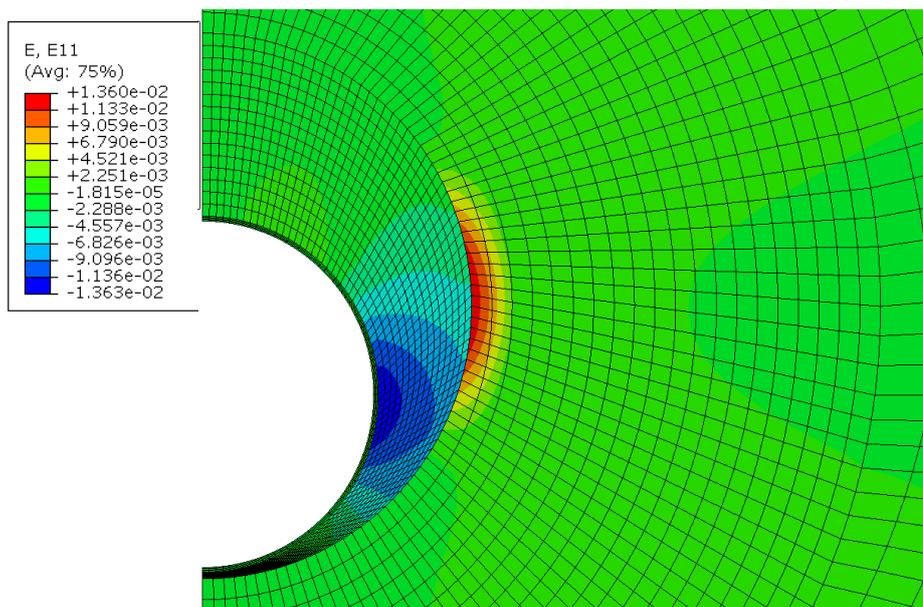


Figura 88 – Detalhe das deformações verticais na condição de tela encostada.

Para melhor visualização dos resultados, a figura 89 apresenta os resultados das deformações verticais e horizontais ao longo da tela. As deformações verticais apresentaram valores máximos (em azul) na zona central da tela (ponto 02), enquanto as deformações horizontais apresentaram valores máximos na região do topo (ponto 01) e na parte inferior da tela. Os valores e a trajetória das deformações podem ser vistos na figura 90.

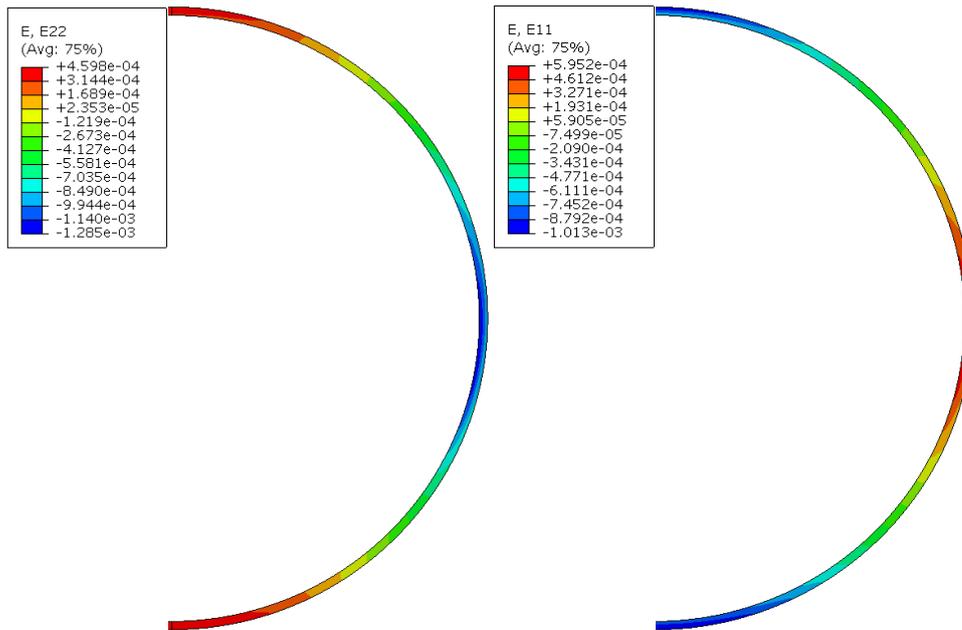


Figura 89 – Deformações verticais e horizontais na tela para condição de tela encostada.

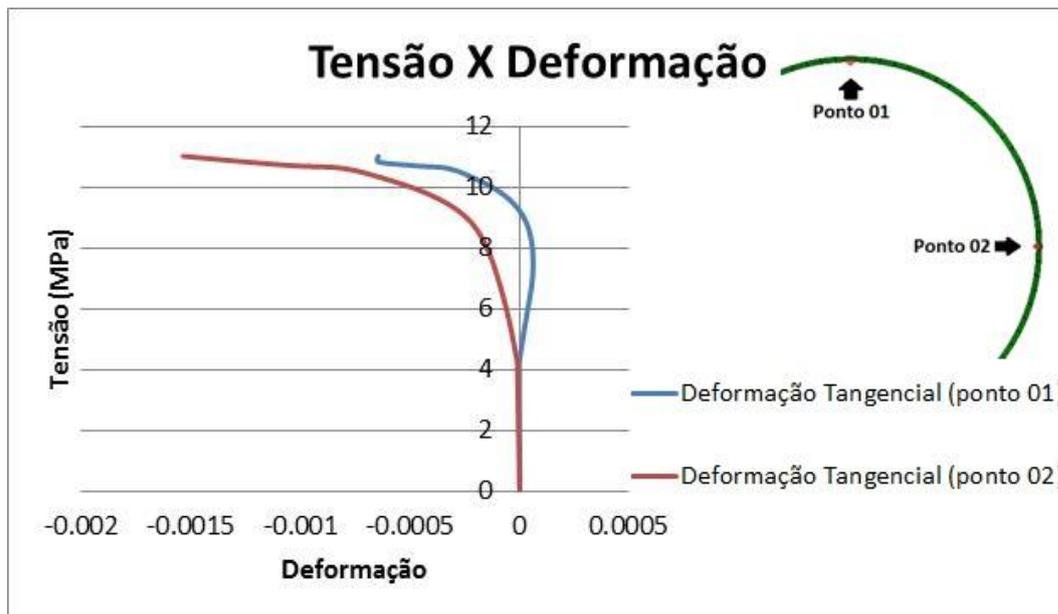


Figura 90 – Tensão (MPa) X Deformação Tangencial – tela encostada (convenção Abaqus).

Durante a primeira etapa (confinamento – 4,13 MPa), a deformação tangencial tanto no ponto 01 quanto no ponto 02 foi nula. Após essa etapa, a deformação tangencial do ponto 01 apresentou valores positivos, ou seja, o ponto 01 sofreu extensão até aproximadamente 8,96 MPa. Posteriormente a esse estado de tensões, a região do ponto 01 começou a sofrer compressão atingindo a deformação tangencial máxima de $-6,4 \times 10^{-4}$. Da mesma forma, após a etapa de confinamento, a deformação tangencial medida no ponto 02 apresentou valores negativos ($-1,5 \times 10^{-3}$ para tensão de 11,03 MPa), mostrando que essa região sofreu contração.

Em seguida, são apresentados os resultados referentes à deformação plástica equivalente (figuras 91 a 93). Esses resultados foram muito similares àqueles obtidos na simulação com a tela centralizada.

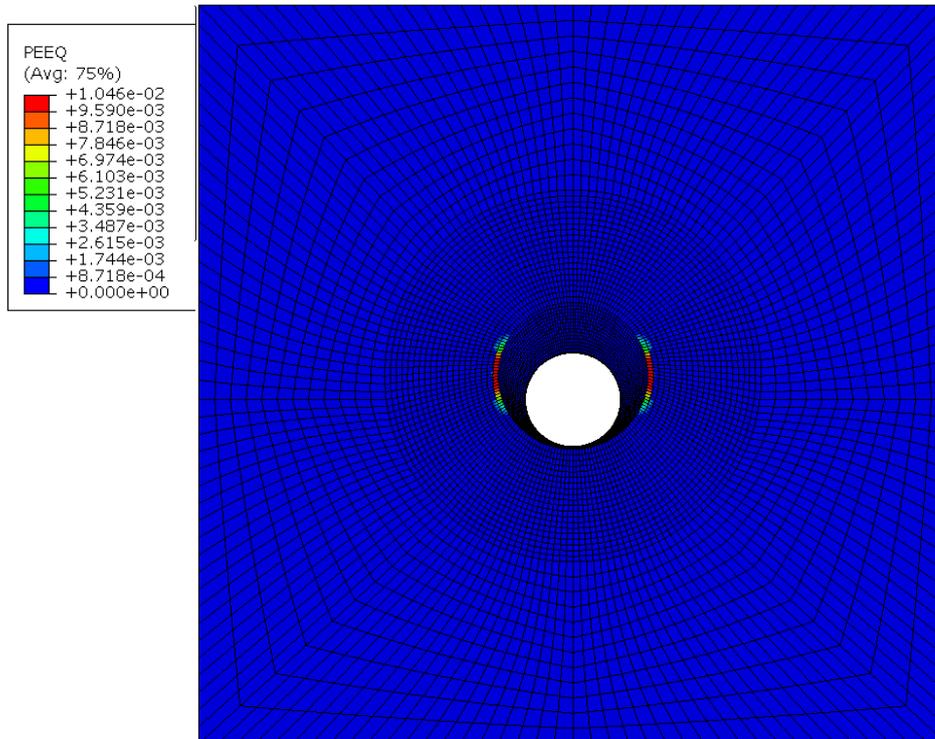


Figura 91 – Deformação plástica equivalente na condição de tela encostada.

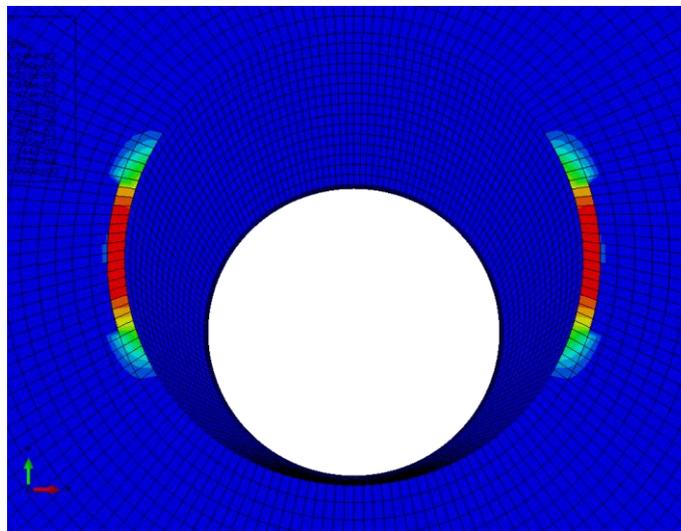


Figura 92 – Detalhe deformação plástica equivalente na condição de tela encostada.

A figura 93 mostra que o escoamento da formação ocorreu com uma tensão aplicada no topo do bloco de 6,82 MPa. No gráfico pode-se observar que a deformação plástica equivalente estabiliza ao atingir o valor 0,01046, assim como ocorreu na simulação da tela centralizada.

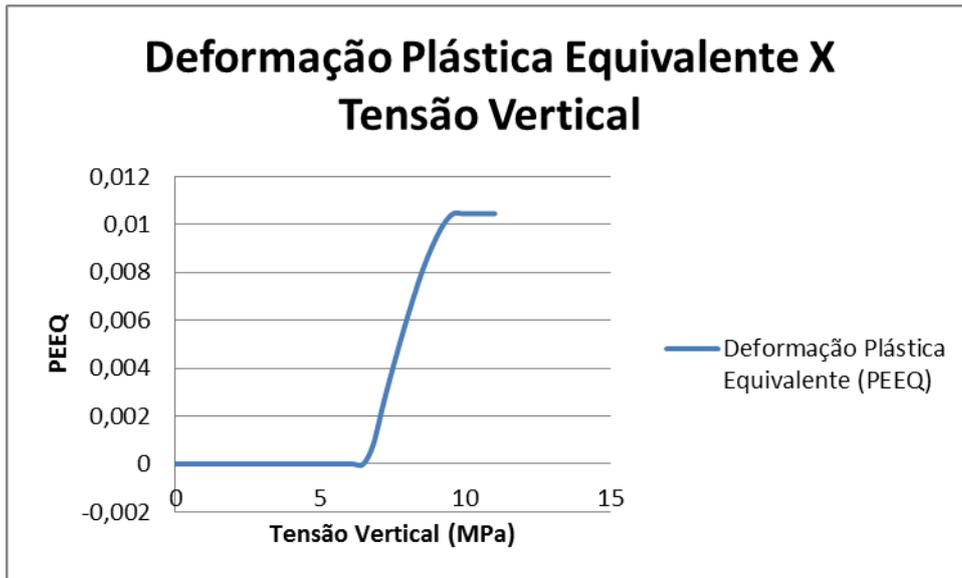


Figura 93 – Deformação plástica equivalente (PEEQ) X Tensão Vertical (MPa) – tela encostada.

A seguir, são apresentados os resultados da distribuição das tensões principais máximas e mínimas (figura 95), bem como das tensões horizontais e verticais na tela (figura 94). Observa-se que as tensões principais máximas se concentraram na parte interna da tela e apresentaram valores máximos e mínimos de -0,22 MPa e -2,64 MPa, respectivamente. Da mesma forma, as tensões principais mínimas foram de -65,3 MPa e -134,1 MPa, respectivamente.

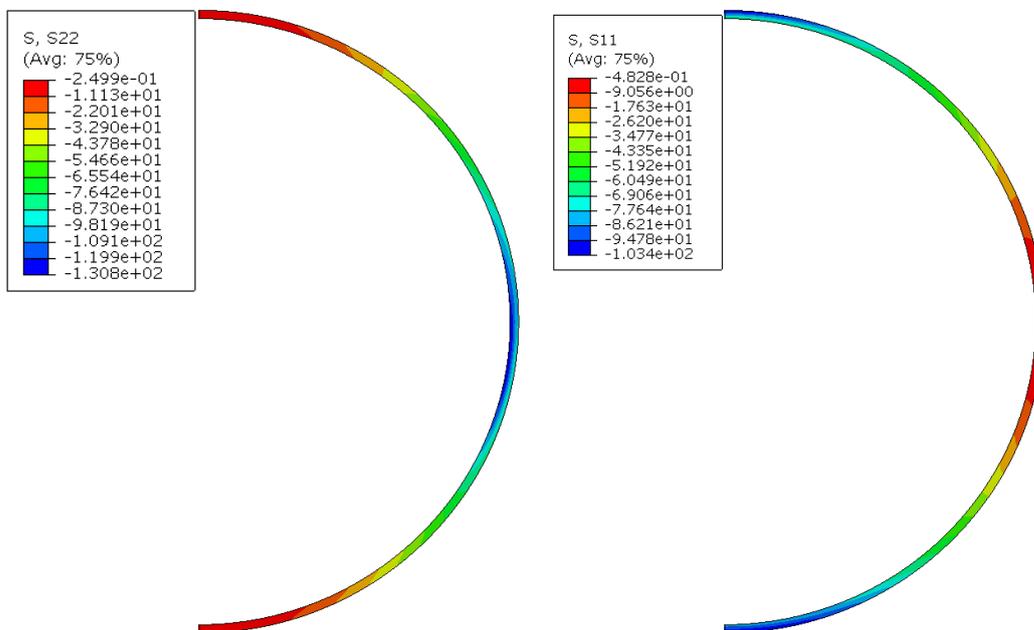
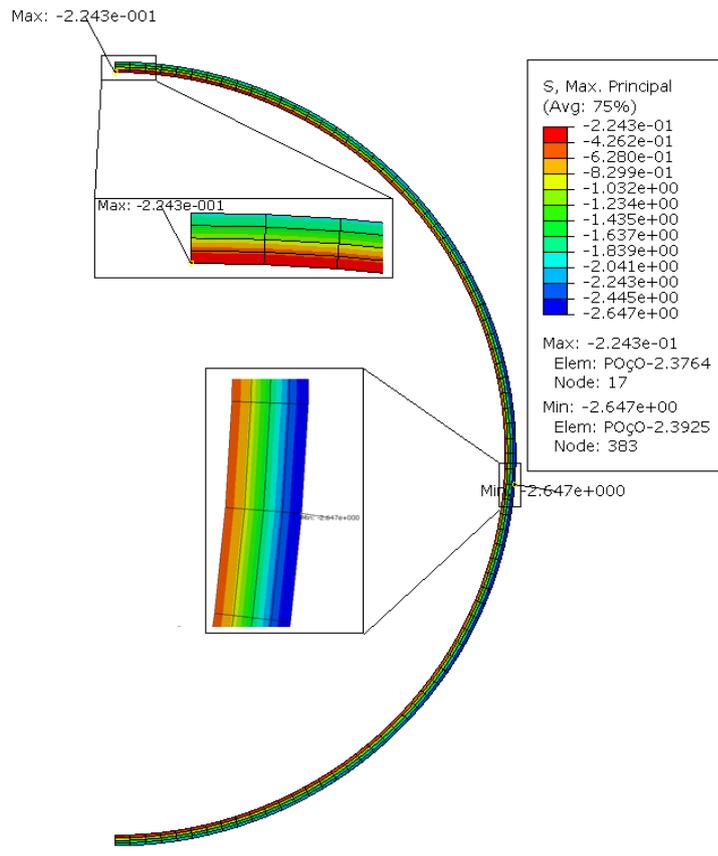
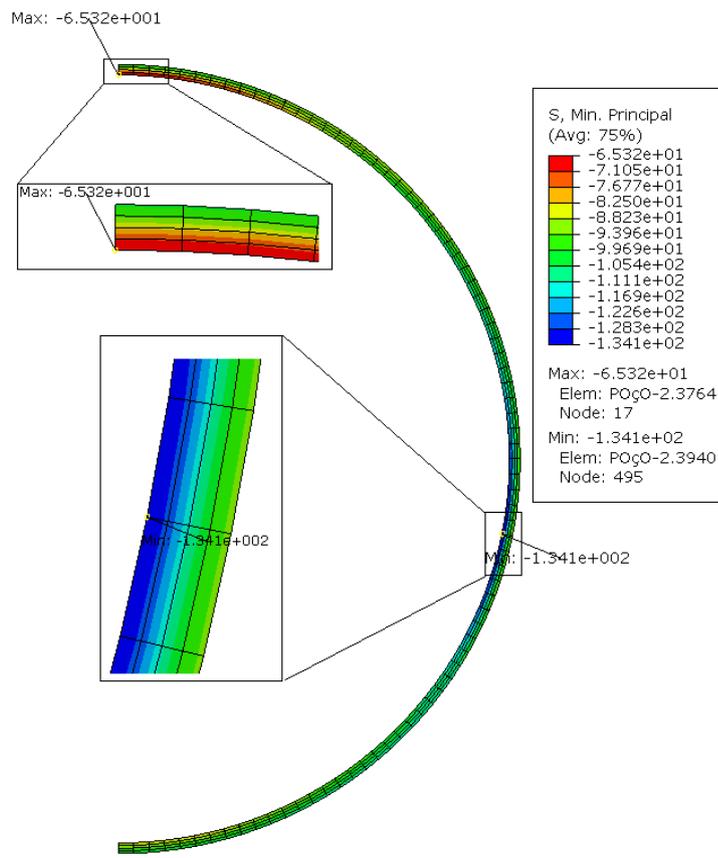


Figura 94 – Tensões horizontais e verticais na tela para condição de tela encostada.



a)



b)

Figura 95 – Tensões máxima e mínima principais na tela para condição de tela encostada.

As variações das tensões radiais e tangenciais ao longo do eixo AB foram plotadas para visualização e comparação entre os resultados obtidos para condição de tela centralizada e encostada (figura 96). Ao longo do trecho AB, observa-se maiores tensões tangenciais em relação às tensões radiais. No entanto, estas tensões tendem a um valor constante conforme se afastam da parede do poço.

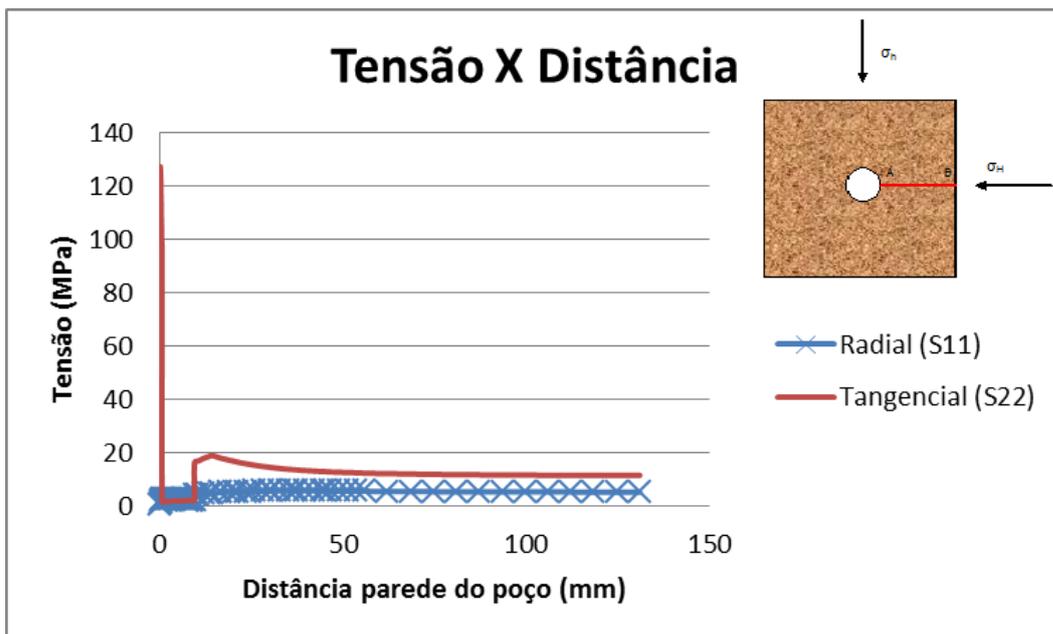
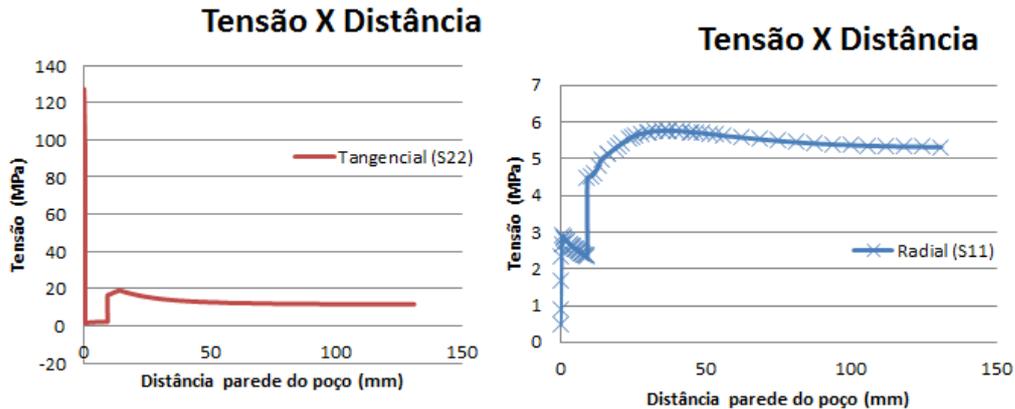


Figura 96 – Tensão ao longo do trecho AB para condição de tela encostada (Abaqus).

A figura 97 apresenta a comparação entre os modelos numéricos para condições de tela centralizada e encostada.

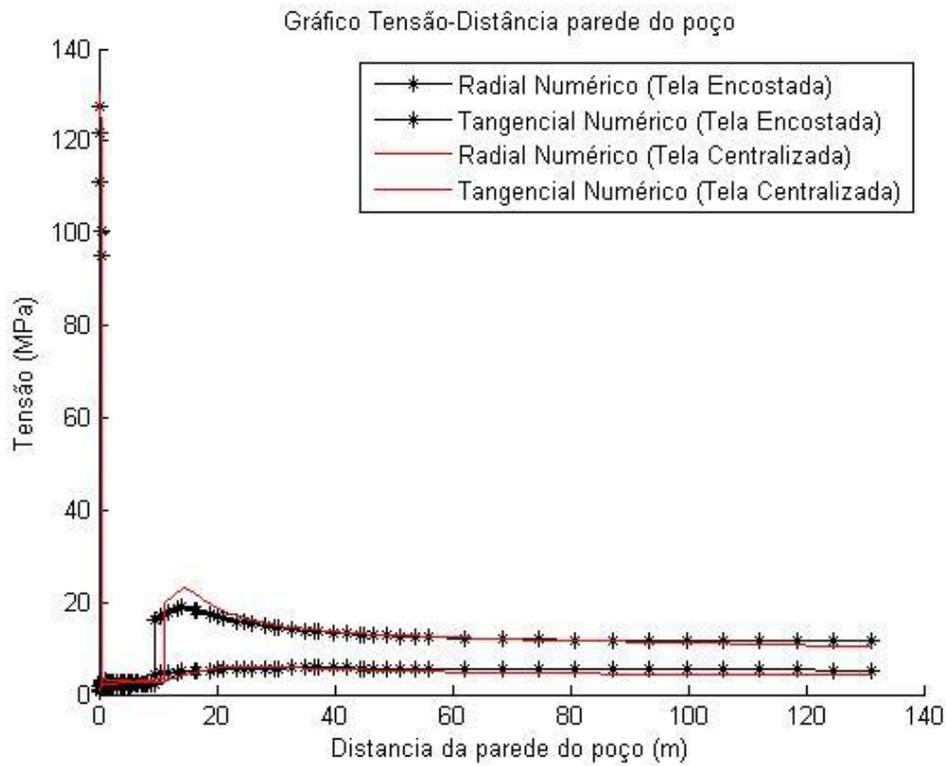


Figura 97 – Comparação dos resultados numéricos para tensão ao redor do poço (tela centralizada e encostada).

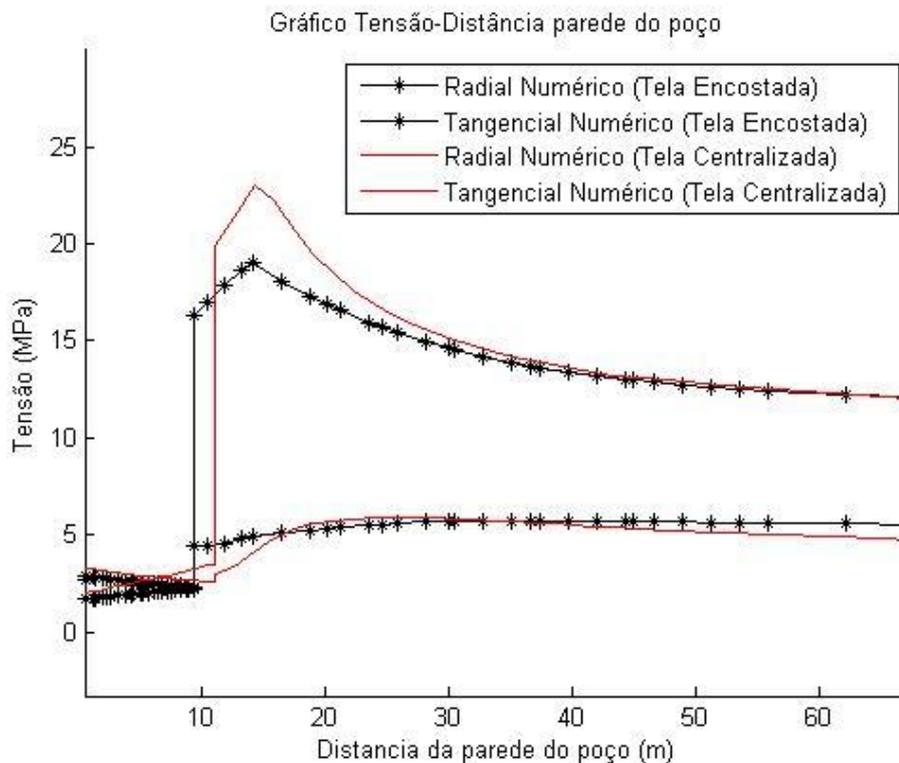


Figura 98 – Detalhe da comparação dos resultados numéricos para tensão ao redor do poço (tela centralizada e encostada).

Os resultados do modelo da tela encostada mostram que as tensões tangenciais ao longo do trecho AB são menores do que os apresentados na tela centralizada.

5.1.3. Resultados Obtidos na Condição *Stand Alone*

A solução explícita foi utilizada para o modelo *stand alone*, dado que o modelo não convergia nas tentativas utilizando o *solver* implícito do Abaqus, devido aos altos níveis de tensão e deformação. Para simular a análise utilizando o Abaqus explícito, foi necessário o uso de um modelo quase estático, a fim de evitar o efeito da variação de energia, como explicado no item 4.1.2.

Com isso, a figura 99 apresenta o equilíbrio das forças externas e internas para comprovar que o modelo está em equilíbrio a todo o momento (efeito do amortecimento).

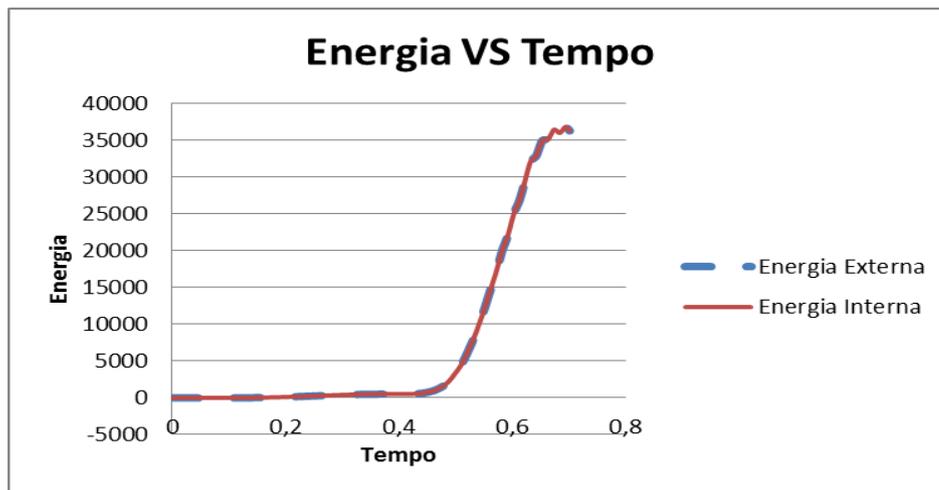


Figura 99 – Equilíbrio das energias internas e externas para o modelo quase estático no Abaqus.

Foram analisadas as seguintes variáveis: deslocamento vertical e horizontal; deformação vertical e horizontal; tensão vertical e horizontal; tensão principal máxima e mínima. Também foi analisada a deformação plástica equivalente.

As figuras 100 e 101 apresentam o modelo antes e depois da aplicação do carregamento. Para observar o comportamento do tubo, foram aplicadas maiores tensões (59 MPa), além do carregamento aplicado em laboratório (48,26 MPa). Isso explica a deformação significativa presente nas próximas figuras.

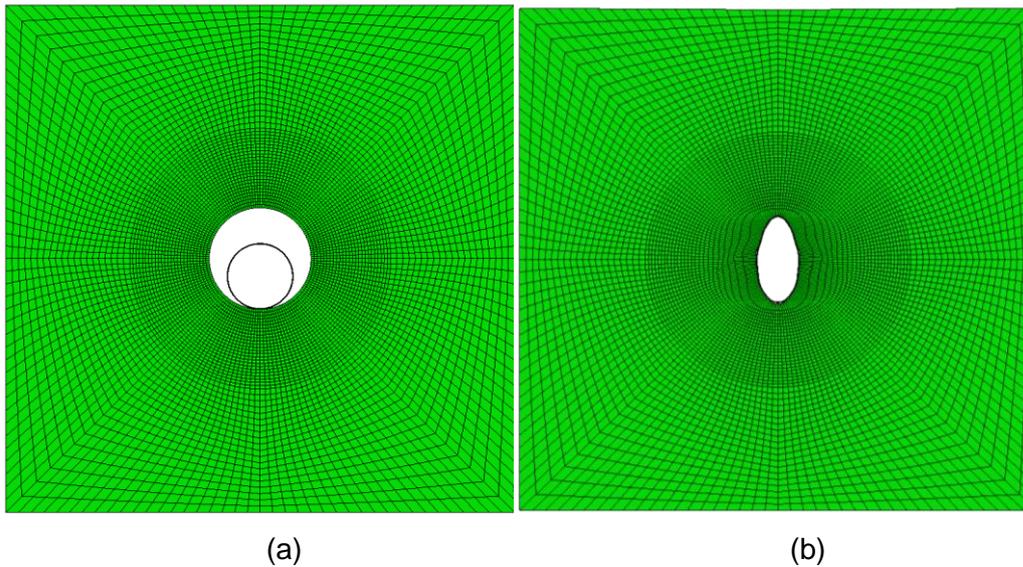


Figura 100 – Stand Alone: (a) Antes do carregamento; (b) Após o carregamento.

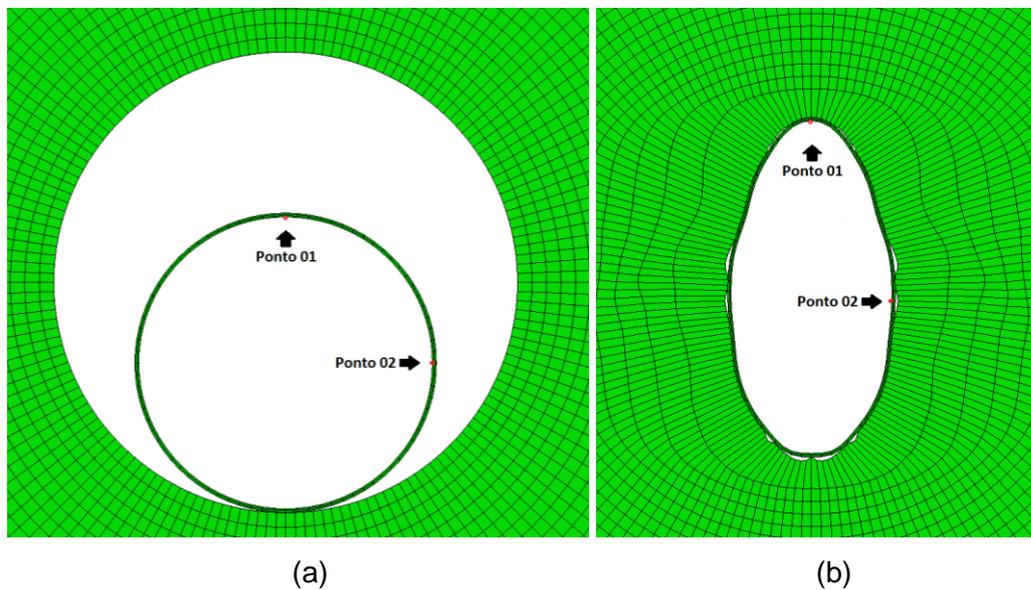


Figura 101 – Detalhe Stand Alone: (a) Antes do carregamento; (b) Após o carregamento.

Os deslocamentos verticais podem ser visualizados nas figuras 102 e 103. Percebe-se que a região do ponto 01 (figura 101) sofreu deslocamento positivo, afastando-se do ponto de origem devido à plastificação e consequente contato formação-tela. Da mesma forma, a região do ponto 02 sofreu deslocamento negativo, o que pode ser visto nas figuras 104 e 105. Nelas, observa-se que o deslocamento horizontal na formação é constante, exceto na região de plastificação.

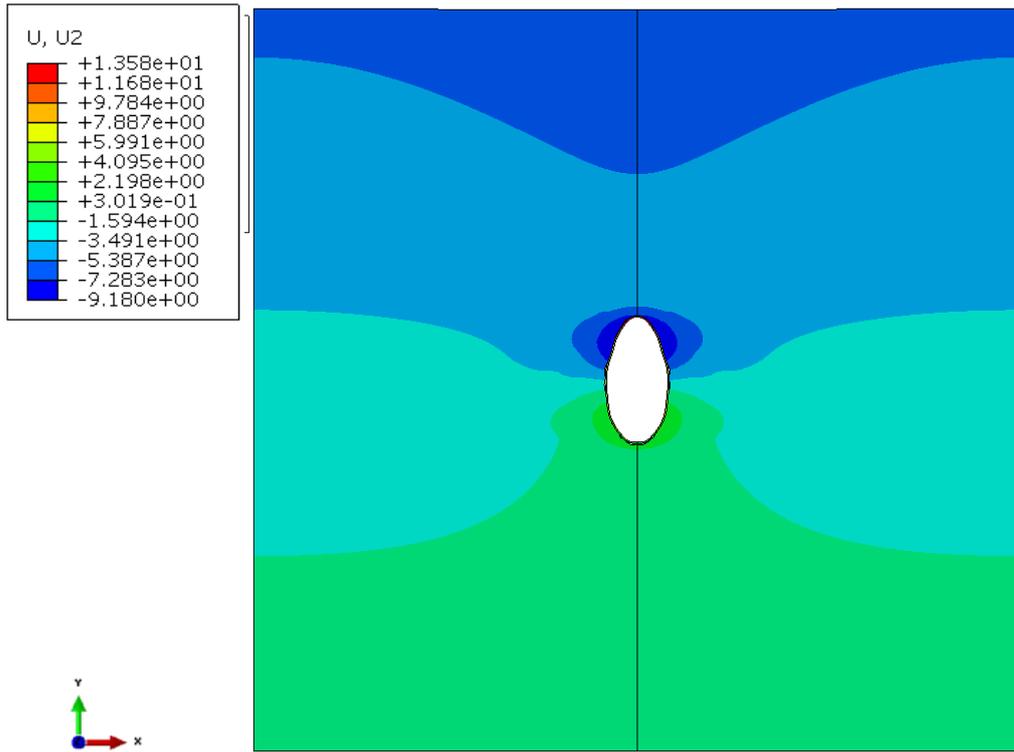


Figura 102 – Deslocamento vertical na condição *stand alone*.

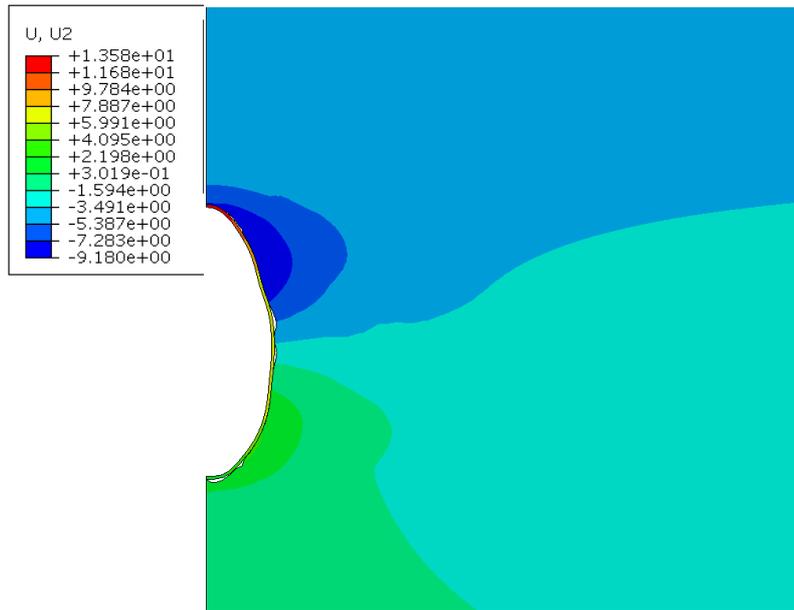


Figura 103 – Detalhe do deslocamento vertical na condição *stand alone*.

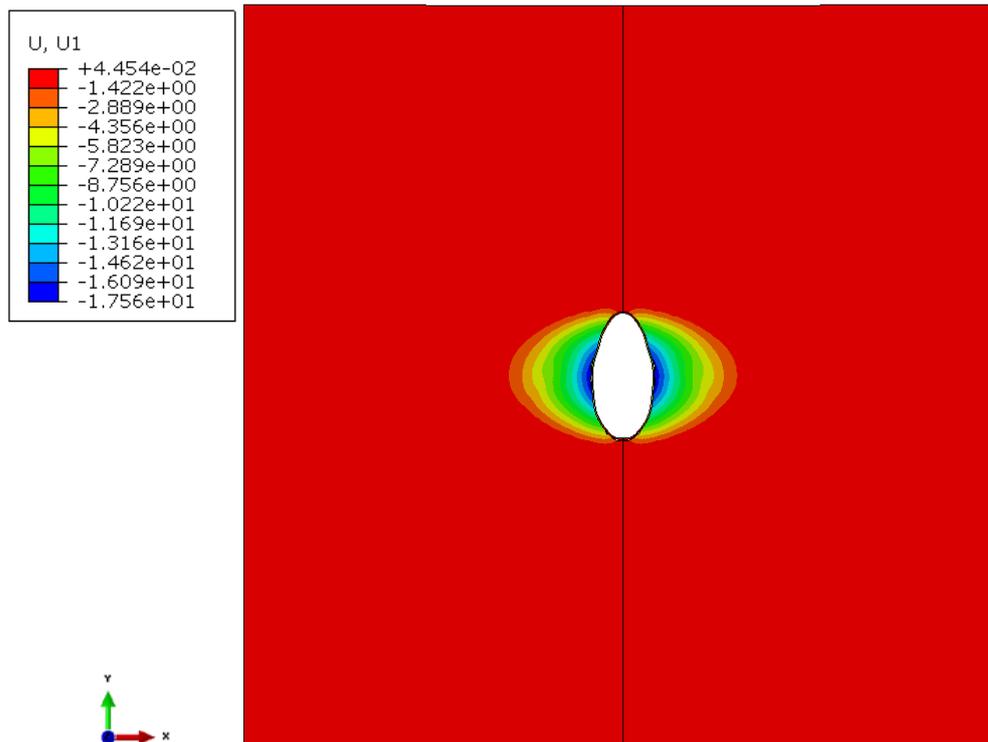


Figura 104 – Deslocamento horizontal na condição *stand alone*.

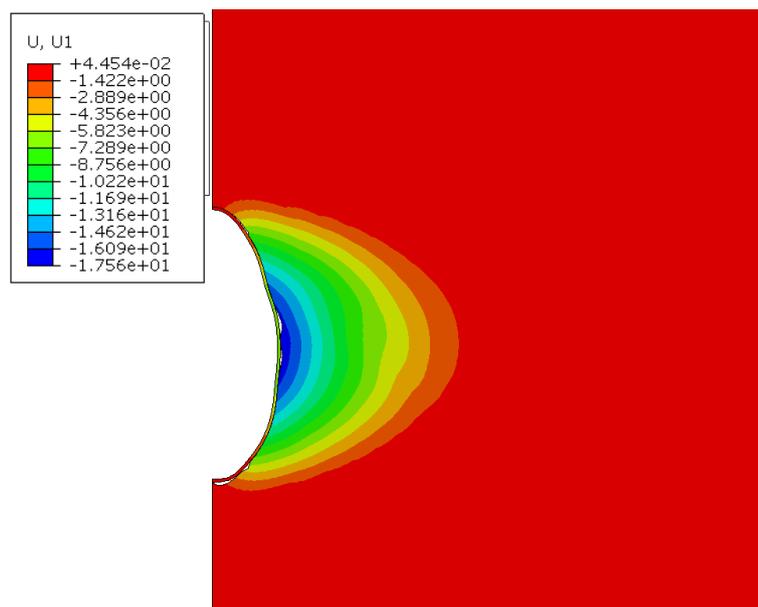


Figura 105 – Detalhe do deslocamento horizontal na condição *stand alone*.

A figura 106 apresenta os resultados dos deslocamentos ao longo da tela. Os deslocamentos verticais apresentaram valores máximos (em vermelho) no topo da tela (ponto 01), enquanto os deslocamentos horizontais apresentaram valores máximos na região central da tela (ponto 02). Os valores e a trajetória dos deslocamentos podem ser observados na figura 107 a seguir.

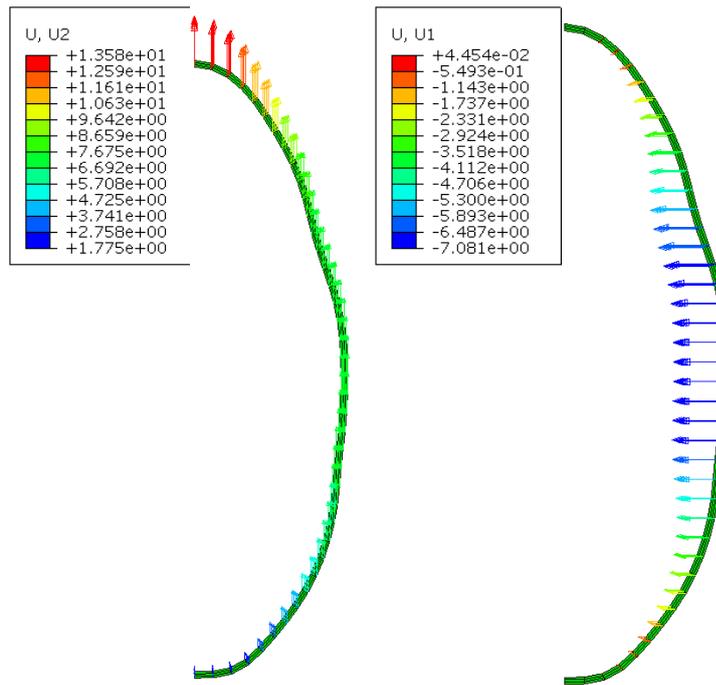


Figura 106 – Deslocamentos verticais e horizontais na tela para condição *stand alone*.

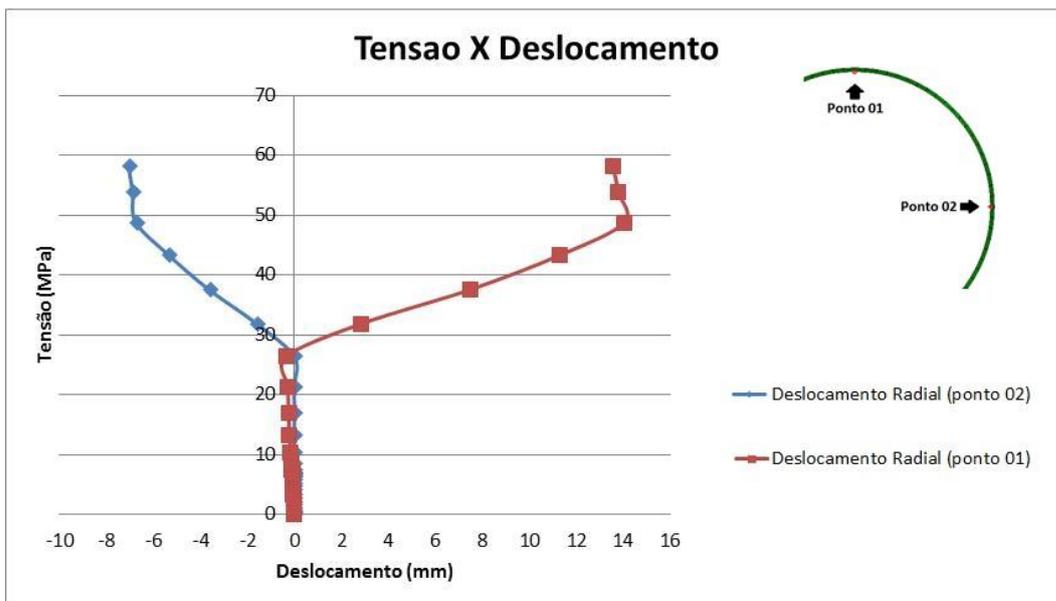


Figura 107 – Tensão (MPa) X Deslocamento Radial (mm) – *stand alone* (convenção Abaqus).

Os deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 começam a ocorrer no contato entre a formação e a tela. Esse contato ocorre a uma tensão vertical aplicada de 27,58 MPa. Após 48,26 MPa, o deslocamento radial tanto no ponto 01 quanto no ponto 02 tende a diminuir devido ao contato formação-tela no ponto 01, localizado no topo da tela. Isso se deve à plastificação que ocorre próximo ao ponto 02 e que permite o contato no topo da tela. A figura 108 apresenta imagens sequenciais da geometria em consequência da deformação sofrida pela formação.

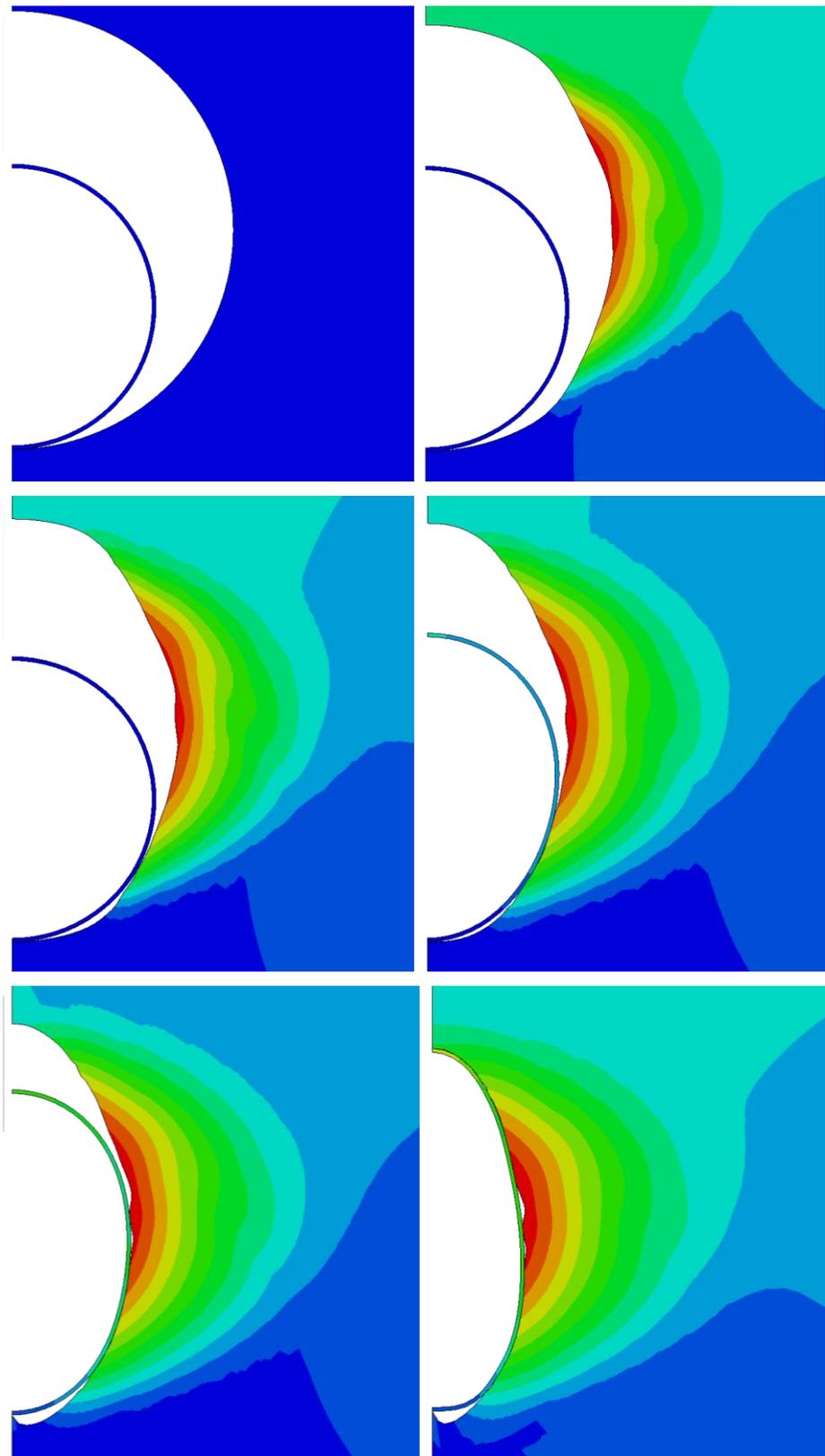


Figura 108 – Figuras sequenciais da alteração da geometria da formação e o contato tela-formação.

A seguir são apresentados os resultados das deformações horizontais e verticais para a condição *stand alone*. Nas figuras 109 e 110, nota-se que a

deformação horizontal ocorre com valores máximos (em vermelho) na região de plastificação da formação (próximo ao ponto 02 – ocorrência do *break-out*).

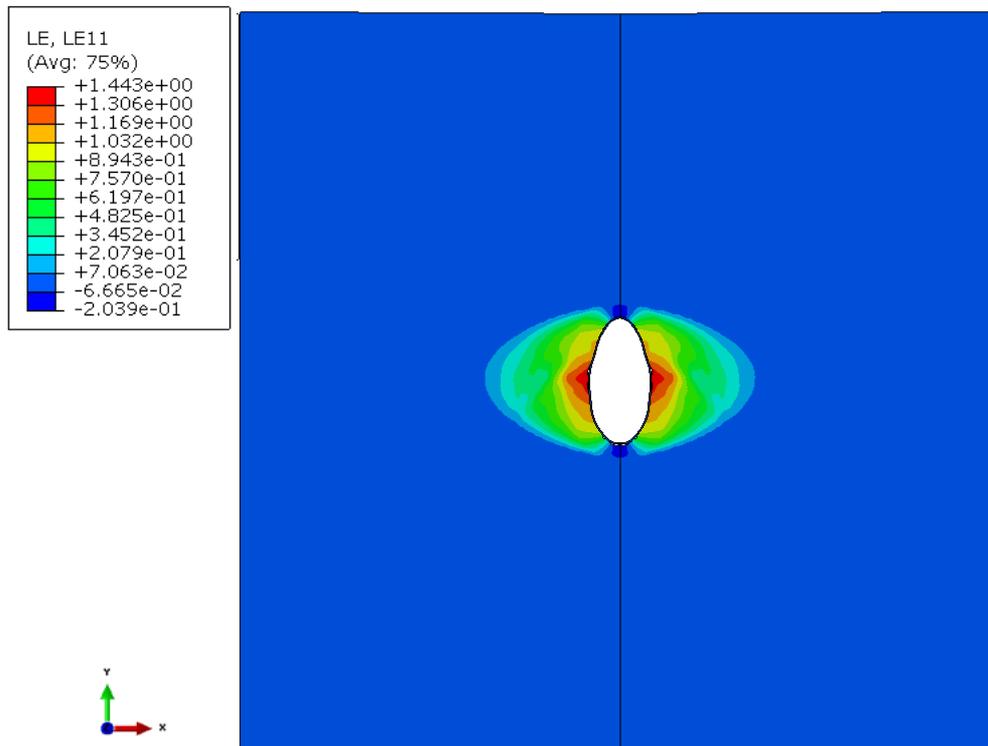


Figura 109 – Deformação horizontal na condição *stand alone*.

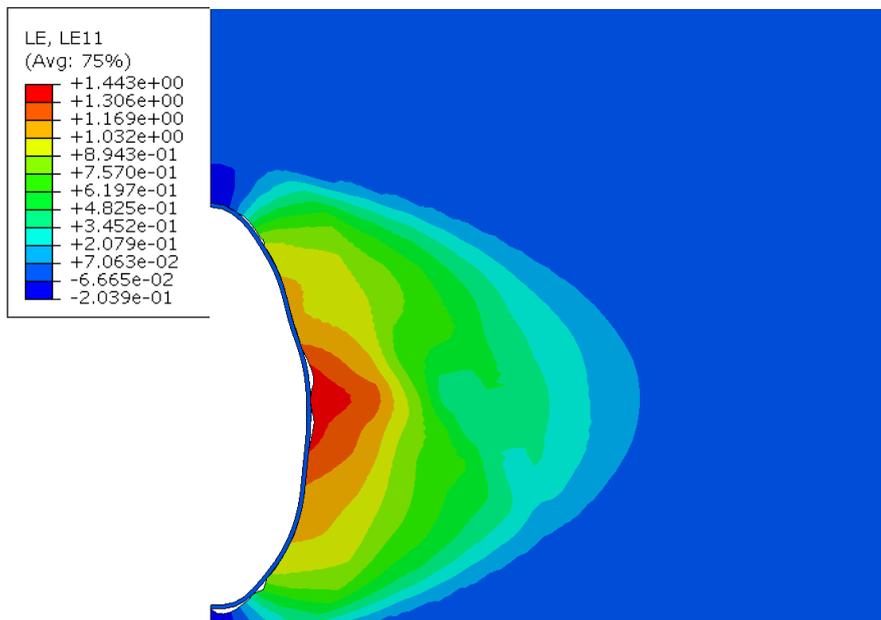


Figura 110 – Detalhe da deformação horizontal na condição *stand alone*.

As deformações verticais são apresentadas nas figuras 111 e 112. Nelas, nota-se a concentração dessas deformações na região em vermelho no topo da parede do poço. O contorno em azul, que define a região de plastificação, apresenta deformações verticais mínimas.

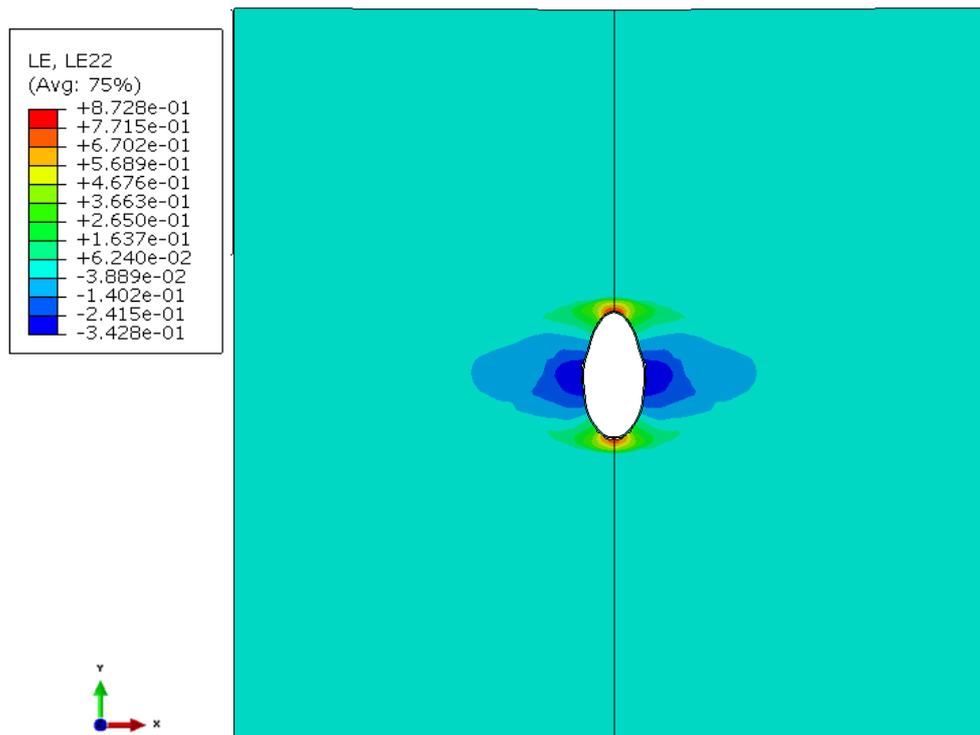


Figura 111 – Resultado da simulação da deformação vertical para o modelo *stand alone*.

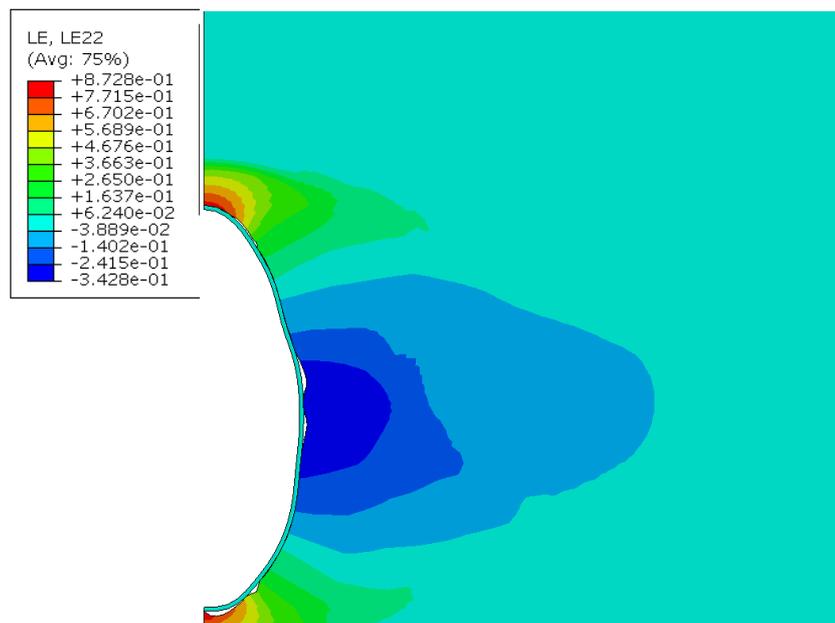


Figura 112 – Detalhe da deformação vertical para o modelo *stand alone*.

Como as medidas do modelo físico foram realizadas na parte interior da tela, as figuras 113 e 114 apresentam os resultados das deformações tangenciais horizontais e verticais na parede do poço para os pontos 01 e 02, respectivamente.

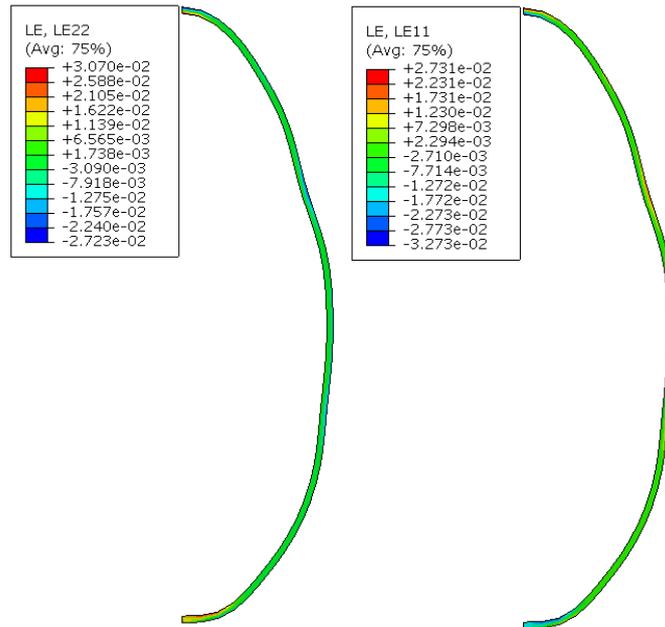


Figura 113 – Deformações verticais e horizontais elásticas na tela na condição *stand alone*.

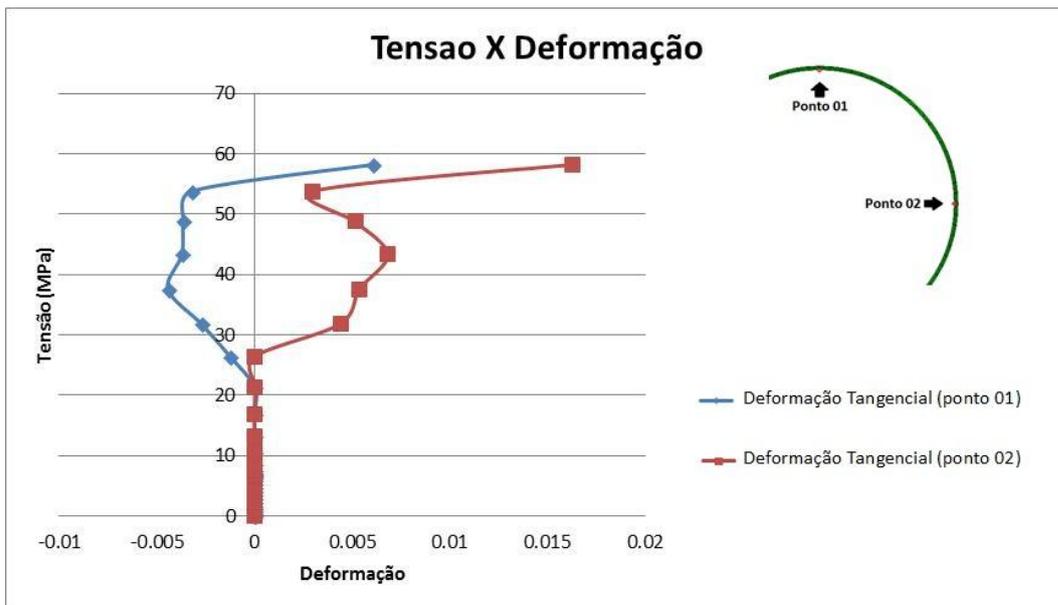


Figura 114 – Tensão (MPa) X Deformação Tangencial - *stand alone* (convenção Abaqus).

A deformação tangencial (figura 114) só inicia após o contato formação-tela, que ocorre quando a aplicação da tensão vertical chega a 24 MPa. Nessa figura, pode-se relacionar o resultado obtido com o do ensaio com a tela encostada, onde inicialmente o ponto 01 sofre tração, adquirindo valores de deformação tangencial positivos, e depois sofre compressão (a partir de 55,16 MPa). Nesse caso (*stand alone*), a tela também sofre compressão no ponto 01 inicialmente e depois extensão.

Com relação à deformação tangencial no ponto 02, a mudança da tendência apresentada até a tensão de 53,78 MPa pode ser justificada pelo contato formação-tela no topo da tela (ponto 01), resultando em deformações de contração no ponto 02.

A seguir, são apresentados os resultados referentes à deformação plástica equivalente (PEEQ). Esses valores foram maiores do que os obtidos na simulação para os casos de tela centralizada e encostada.

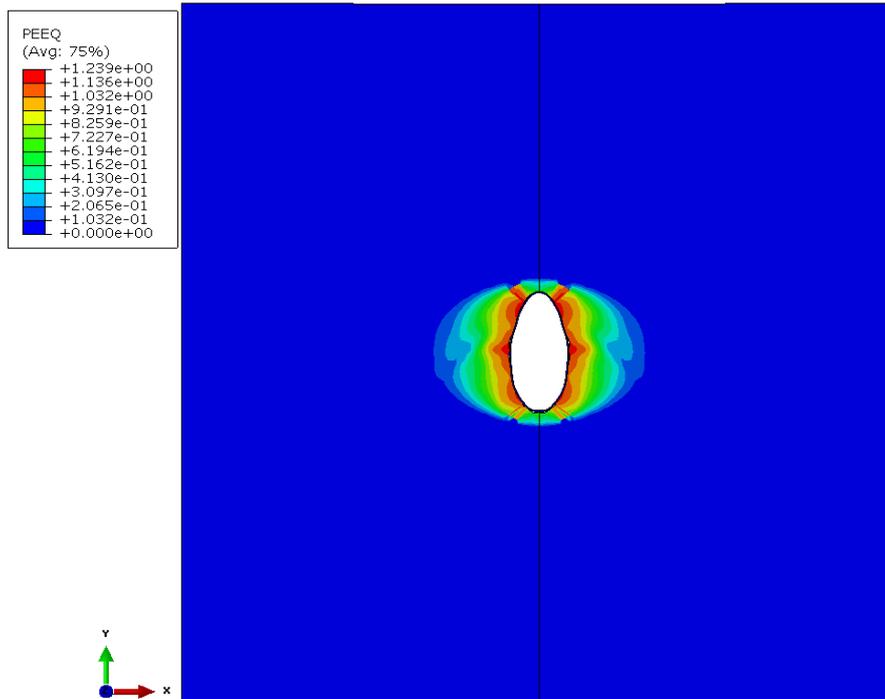


Figura 115 – Deformação plástica equivalente na condição *stand alone*.

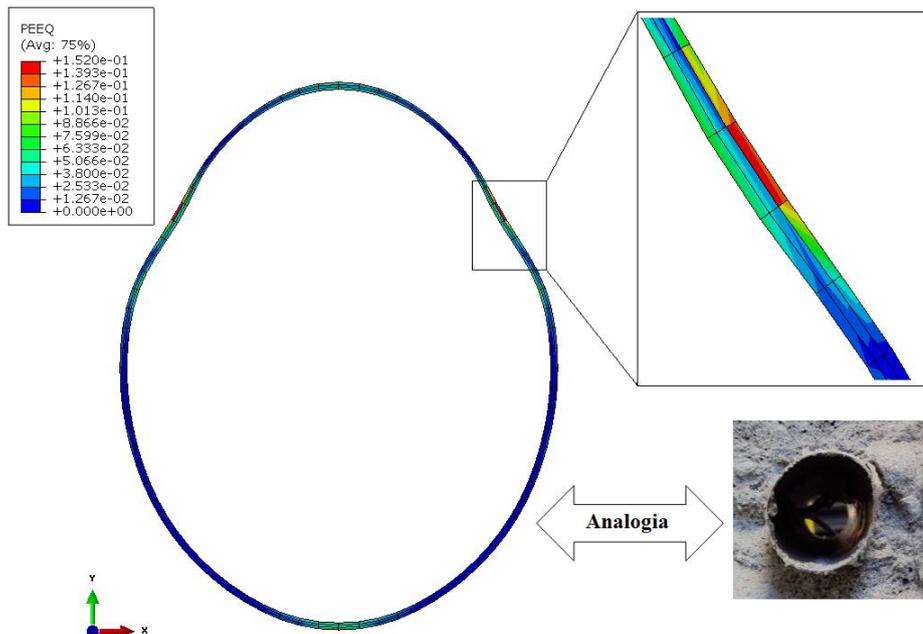


Figura 116 – Deformação plástica equivalente na condição *stand alone* e analogia com modelo físico.

A plastificação da formação ocorreu de maneira bastante similar à descrita por Chavez (2011) para o modelo físico. A figura 116 apresenta os resultados da plastificação equivalente na tela e nela observa-se que as maiores deformações foram nas regiões em verde e vermelho destacadas.

A figura 117 mostra que o escoamento da formação ocorreu com uma tensão aplicada no topo do bloco de 7,41 MPa. No gráfico pode-se observar que a deformação plástica não se estabiliza como nos outros modelos. A deformação plástica máxima foi de 1,2, valor 100 vezes maior do que o obtido nos outros ensaios. Vale lembrar que a etapa de confinamento e o acréscimo de tensão aplicadas nessa simulação foram maiores do que nos outros modelos.

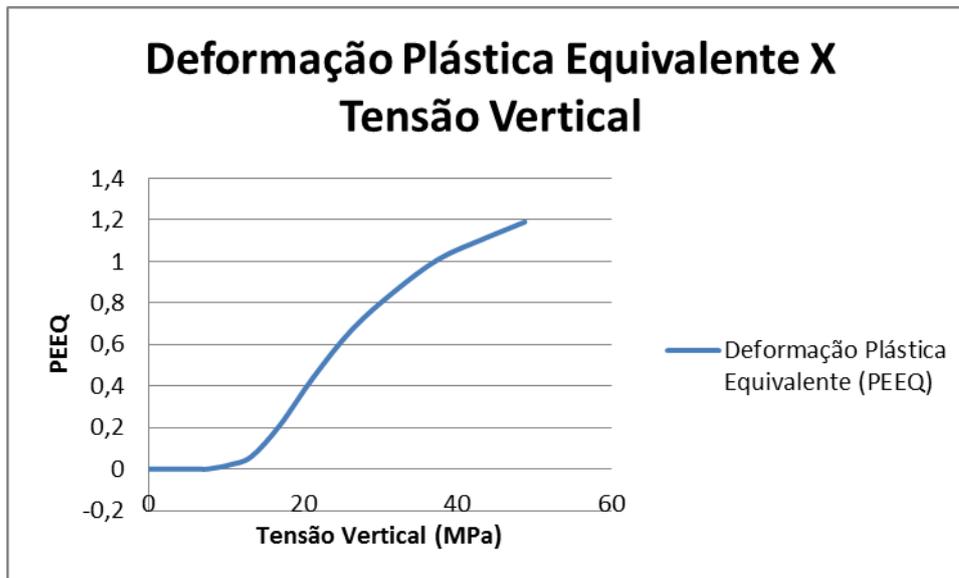


Figura 117 – Deformação plástica equivalente (PEEQ) X Tensão Vertical (MPa) - *stand alone*.

Nas figuras 118 a 120, são apresentados os resultados da distribuição das tensões horizontais e verticais na formação e na tela. Observa-se que as tensões horizontais foram maiores no contato da tela com a região de plastificação da formação. Em relação às tensões verticais (figura 119), essas se concentraram no entorno do poço, com alguns picos no contato com a tela (amarelo). Os valores das tensões verticais e horizontais nas telas podem ser visualizados na figura 120.



Figura 118 – Tensão horizontal na condição *stand alone*.

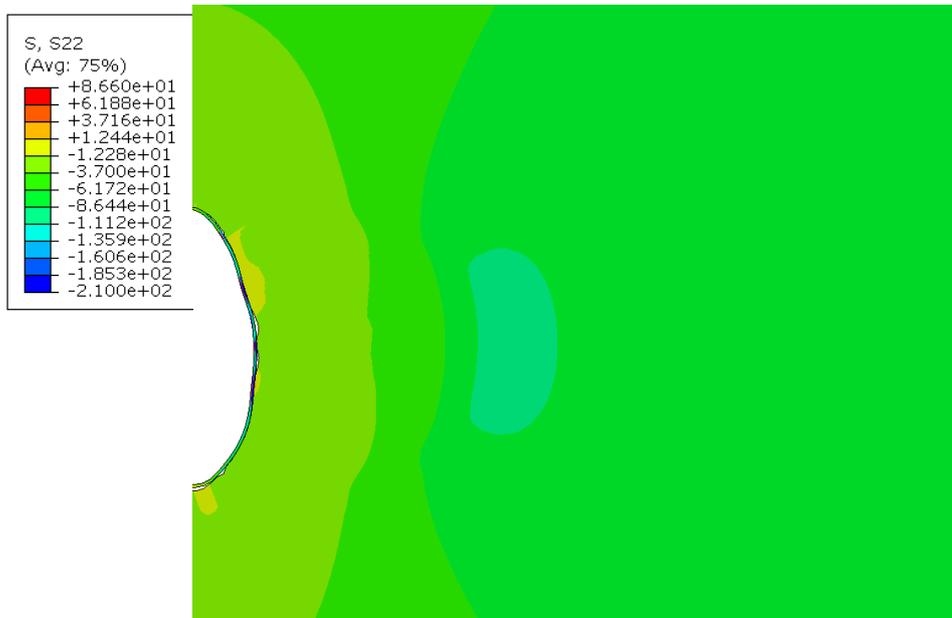


Figura 119 – Tensão vertical na condição *stand alone*.

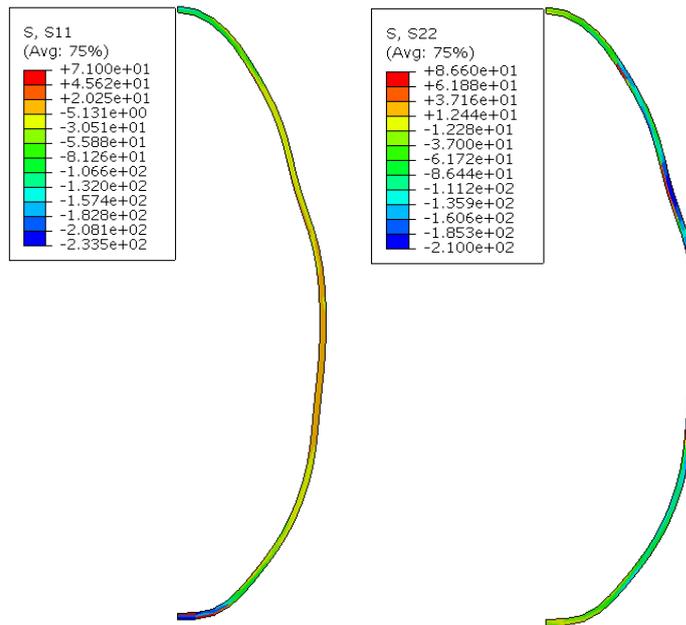


Figura 120 – Tensões horizontais e verticais na tela para condições *stand alone*.

Os resultados das tensões ao longo da tela (figura 120) mostram que as regiões que apresentaram as maiores tensões (233 MPa para tensão horizontal e 2100 MPa para tensão vertical) coincidiram com as regiões de plastificação na tela do poço mostradas anteriormente. Isso se deve à tensão de escoamento adotada para o material da tela, que foi de 484 MPa.

Em seguida, são apresentados os resultados da distribuição das tensões principais na parede da tela (figura 121 e figura 122). Observa-se que a tensão principal maior apresentou valor máximo na região de plastificação da tela, chegando a 105,4 MPa. Da mesma forma, as tensões principais menores se concentraram na parte inferior da tela atingindo 13,2 MPa.

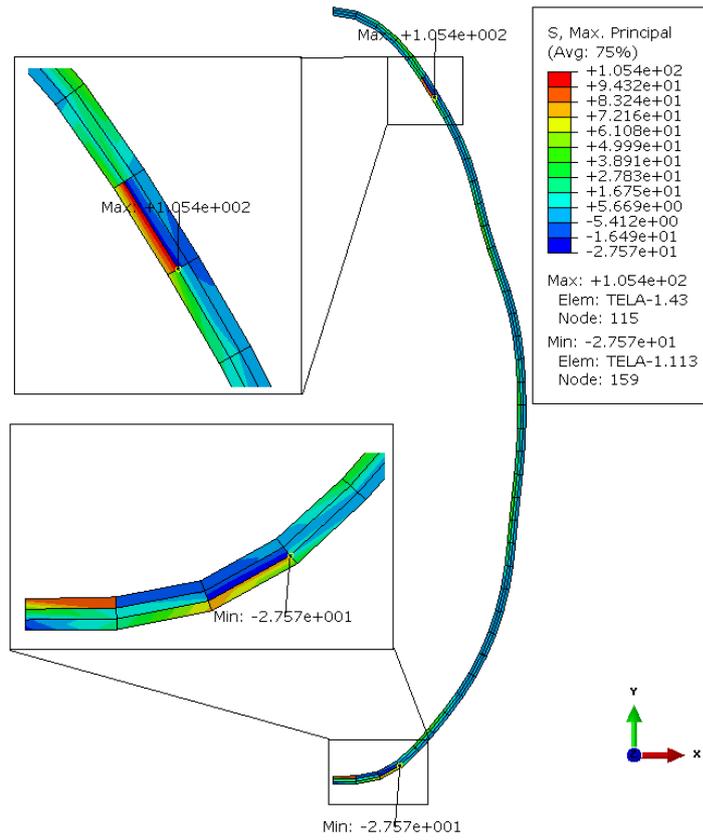


Figura 121 – Tensão principal maior na tela para condição *stand alone*.

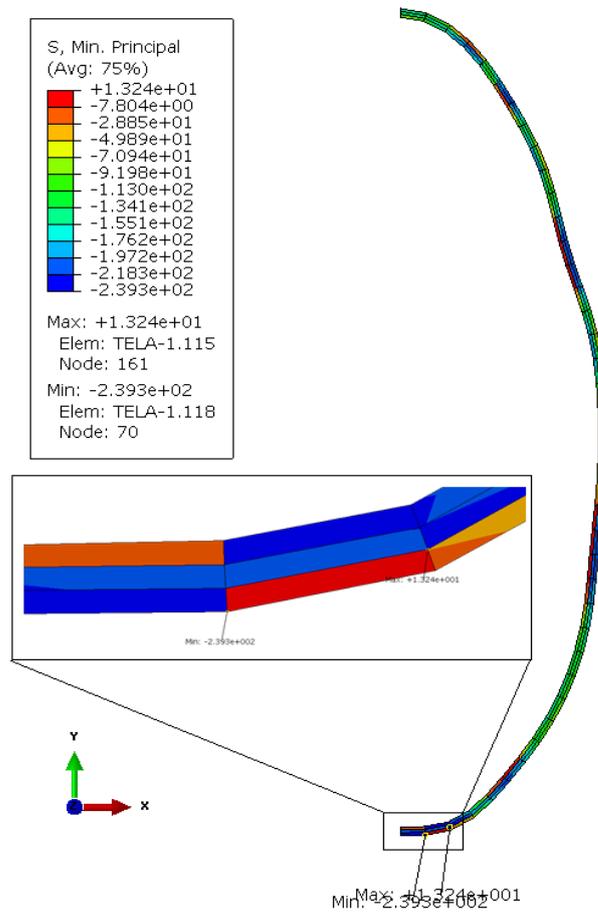


Figura 122 – Tensão principal menor na tela para condição *stand alone*.

5.2. Comparação Numérico-Experimental

Nesta seção são realizadas comparações entre os resultados dos modelos numéricos com os resultados obtidos experimentalmente por Chavez (2011).

5.2.1. Comparação na Condição de Tela Centralizada

A **Figura 123** apresenta os resultados obtidos por Chavez (2011) para os deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 dentro do tubo (tela centralizada).

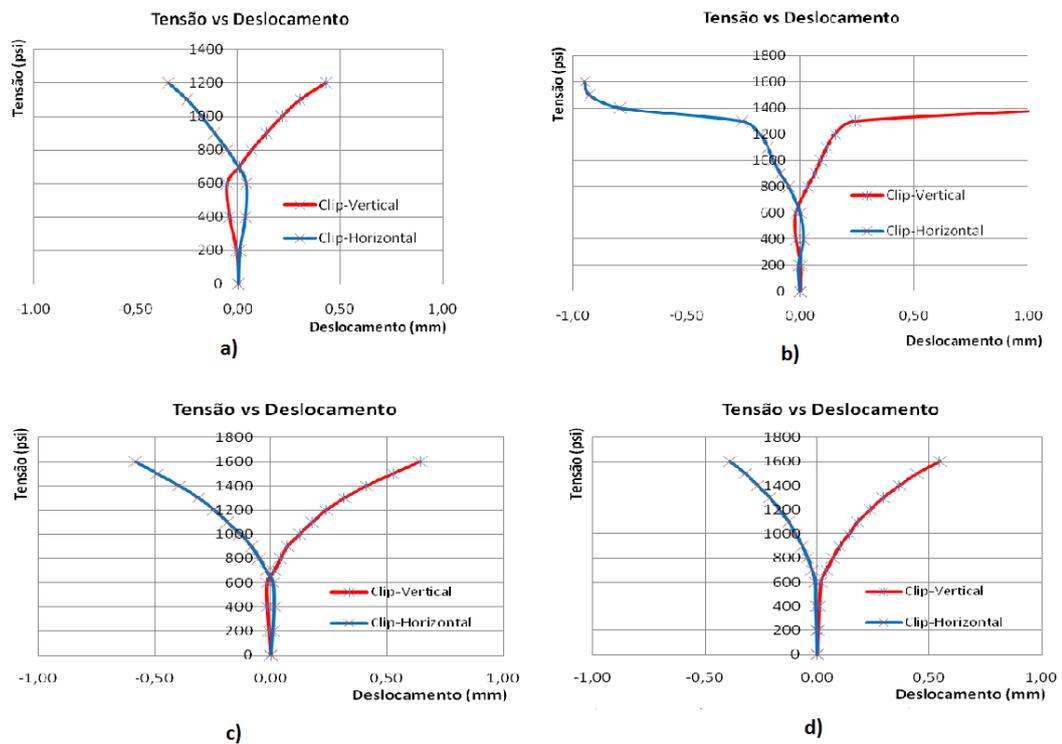


Figura 123 – Tensão X Deslocamento por Chavez (2011): a)bloco A-1a; b)bloco A-1b; c)bloco A2; d)bloco A3.

O item (b) da figura 123 apresenta valores bastante discrepantes dos demais gráficos devido à ruptura sofrida pelo bloco durante o ensaio. Para a comparação dos resultados numérico-experimental (figura 124), foi utilizado o gráfico (d) da figura 123.

Como apresentado na figura 124, durante a etapa de confinamento (até 4,13 MPa) não foram observados grandes deslocamentos. No modelo numérico, isso se deve ao comportamento não linear do *gravel*, que apresenta um módulo de elasticidade inicial de 900 kPa e que aumenta conforme o crescimento da pressão aplicada (200 MPa). Assim, o *gravel*, nesta primeira etapa, tende a se

deformar mais e a suportar as tensões hidrostáticas aplicadas. Já na etapa de acréscimo de tensão vertical, o enrijecimento do *gravel* acaba transmitindo as tensões para a parede da tela.

As curvas obtidas na simulação numérica para os deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 foram bastante satisfatórias quando comparadas aos resultados experimentais. Até a aplicação da tensão vertical de 6,89 MPa, os valores foram bastante condizentes e o comportamento do modelo numérico foi muito parecido com aquele observado.

A diferença obtida para os valores finais (11,03 MPa), tanto para os deslocamentos verticais quanto para os horizontais, pode ser justificada pelo Abaqus ser um programa de elementos finitos e, por isso, não conseguir representar fielmente o *gravel*. Além disso, a utilização do modelo constitutivo de Mohr Coulomb pode não ser o ideal para a simulação.

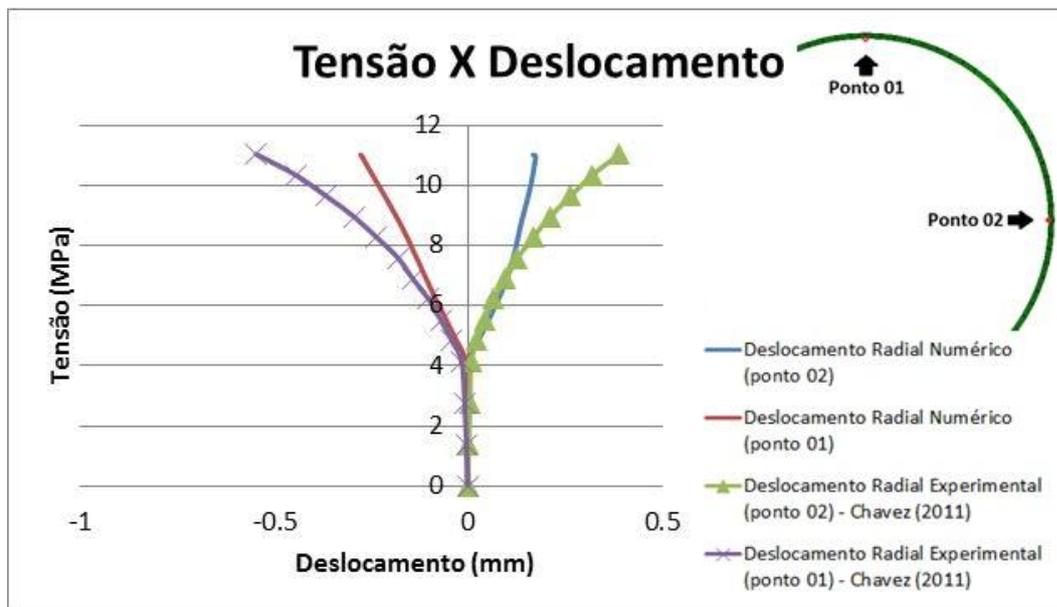


Figura 124 – Tensões verticais aplicadas e deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição de tela centralizada).

A figura 125 mostra os resultados das deformações tangenciais obtidos experimentalmente. Vale lembrar que o programa adota compressão como valor negativo e tração como positivo, o oposto ao adotado no experimento.

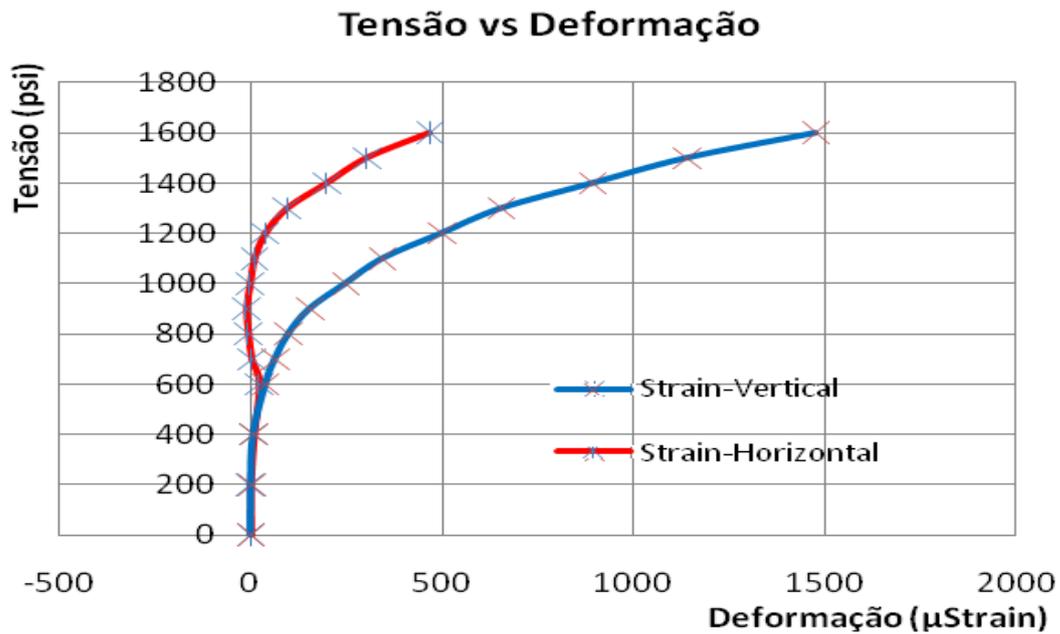


Figura 125 – Tensão X Deformação na condição de tela centralizada por Chavez (2011).

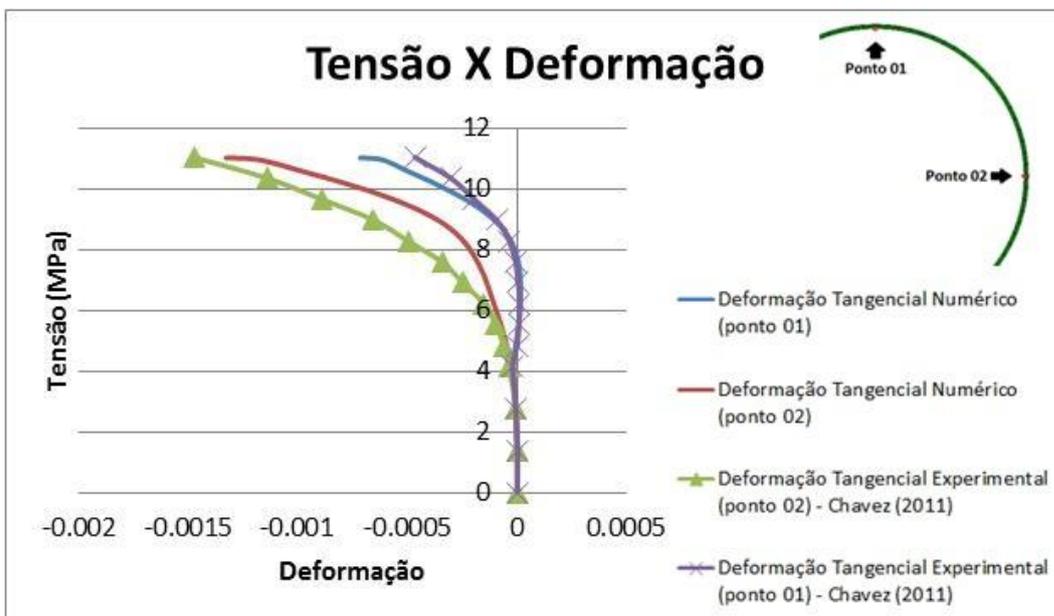


Figura 126 – Tensões verticais aplicadas e deformações tangenciais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição de tela centralizada).

A comparação dos resultados da simulação numérica é apresentada na figura 126 e indica valores próximos em relação aos experimentais. Até a tensão de 9,65 MPa, a deformação tangencial no ponto 01 se comportou de maneira bastante similar àquela medida no modelo físico. Com relação à deformação tangencial do ponto 02, apesar da concordância não ter sido tão boa quanto a do ponto 01, apresentou valores finais muito próximos.

5.2.2. Comparação na Condição de Tela Encostada

Nesta seção são comparados os resultados apresentados no item 5.1.2 com aqueles obtidos no modelo físico por Chavez (2011). A figura 127 ilustra os resultados laboratoriais para os deslocamentos radiais dentro do tubo (ponto 01 e 02 da figura 78). O item (a) dessa figura mostra valores exagerados com relação aos demais gráficos devido à ruptura sofrida pelo bloco durante o ensaio. Para comparação dos resultados, tanto a parte numérica quanto a experimental (figura 127 item c) foram sobrepostas, gerando a figura 128 a seguir.

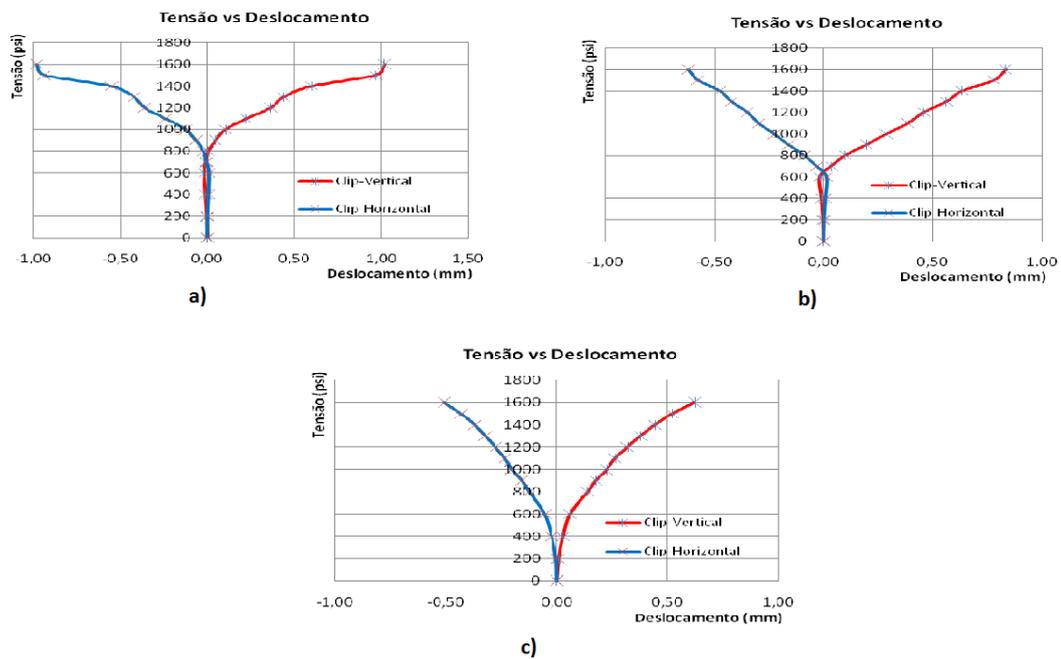


Figura 127 – Tensão X Deslocamento por Chavez (2011): a)bloco B-1; b)bloco B-2; c)bloco B3.

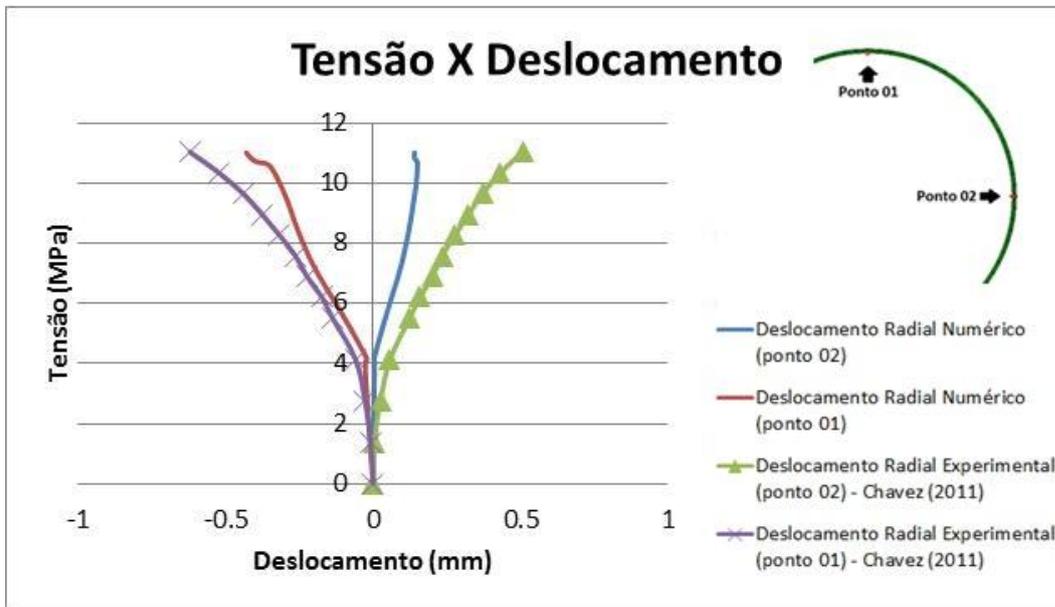


Figura 128 – Tensões verticais aplicadas e deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição de tela encostada).

Como apresentado na figura 128, durante a etapa de confinamento (até 4,13 MPa), foram observados pequenos deslocamentos tanto para a análise do modelo físico quanto para a análise numérica. No modelo numérico, isso se deve ao modelo constitutivo utilizado e à não linearidade do *gravel*.

Assim, no início, o *gravel* suporta maiores deformações devido ao seu baixo módulo de elasticidade e evita que as tensões sejam transmitidas para a tela. Como a geometria do modelo permite que haja contato entre a tela e a formação no bordo inferior da mesma, os deslocamentos radiais no ponto 01 são diferentes de zero na etapa de confinamento. Já na etapa de acréscimo de tensão vertical, o enrijecimento do *gravel*, provavelmente, acaba transmitindo as tensões na parede da tela e, como pode ser observado, o deslocamento radial no ponto 01 acaba sendo maior do que no ponto 02.

A figura 129 apresenta os resultados das deformações obtidas experimentalmente.

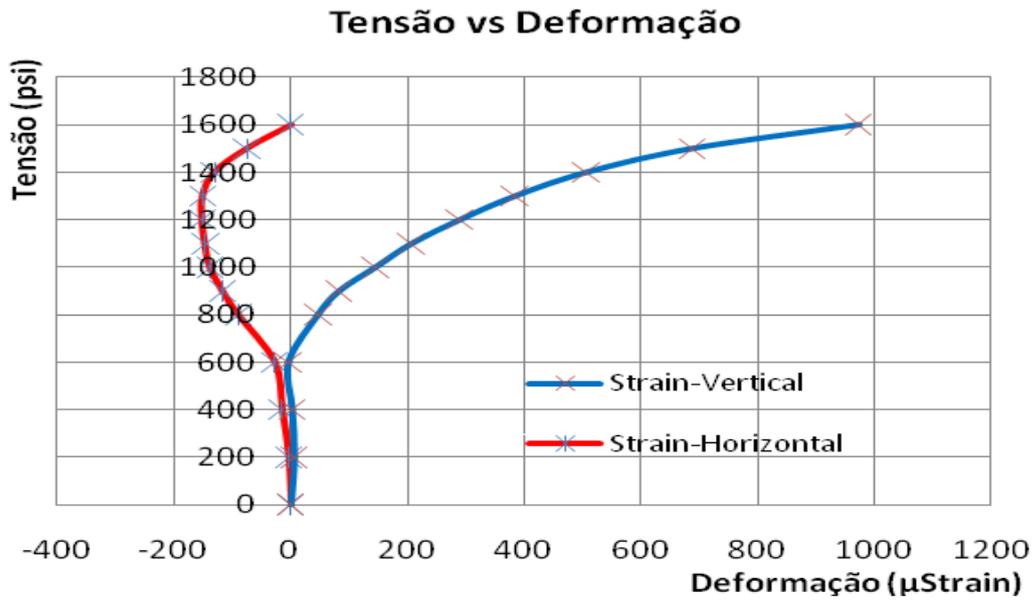


Figura 129 – Tensão X Deformação na condição de tela encostada por Chavez (2011).

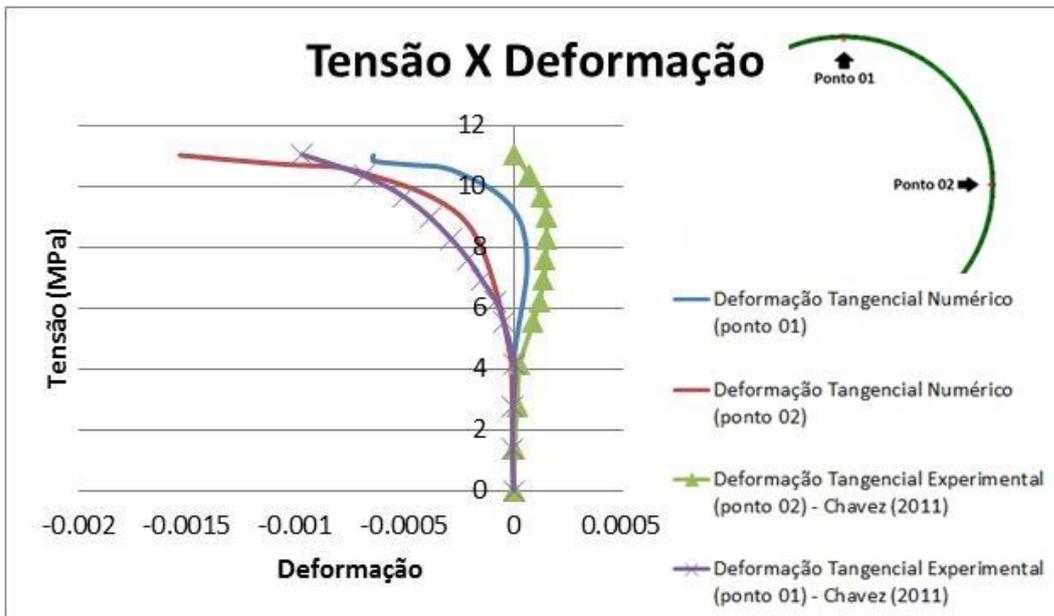


Figura 130 – Tensões verticais aplicadas e deformações tangenciais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição de tela encostada).

A figura 130 mostra a comparação entre os resultados das deformações obtidas experimentalmente e numericamente. Os resultados numéricos, apesar de não serem precisos nos valores finais, apresentaram o mesmo comportamento obtido experimentalmente, ou seja, o ponto 02 (figura 78) sofreu extensão e depois contração, enquanto o ponto 01 sofreu apenas contração.

5.2.3. Comparação na Condição Stand Alone

A figura 131 apresenta os resultados obtidos por Chavez (2011) para os deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 dentro do tubo (*stand alone*).

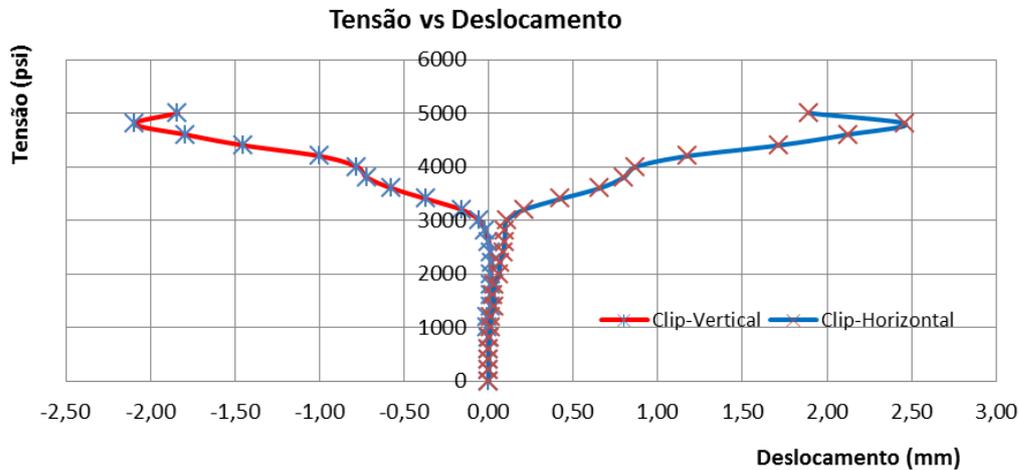


Figura 131 – Tensão X Deslocamento por Chavez (2011).

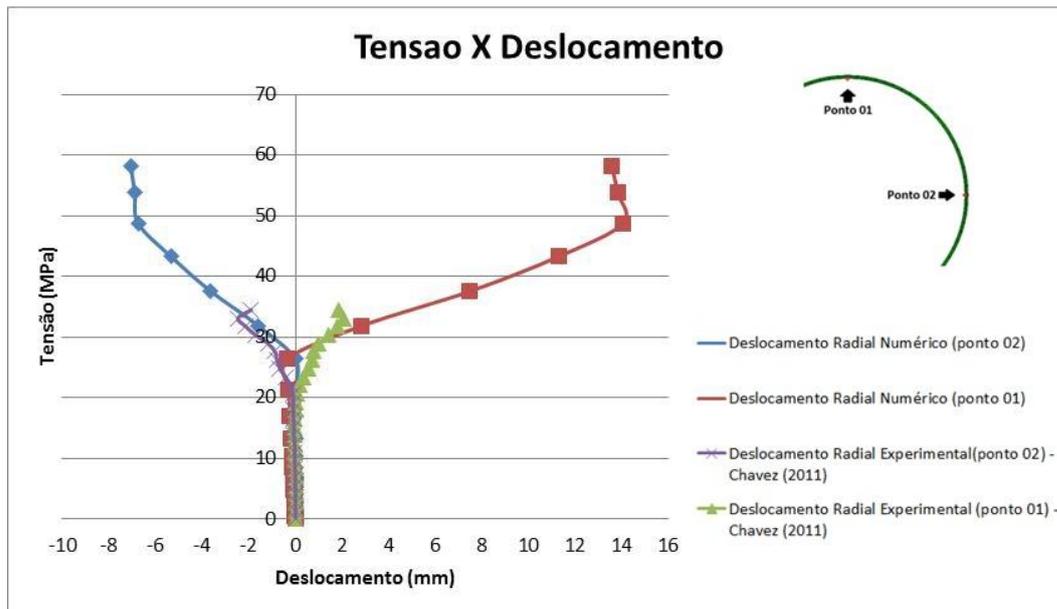


Figura 132 – Tensões verticais aplicadas e deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição *stand alone*).

Como comentado no item 5.1.3, os detritos oriundos da ruptura da formação só entram em contato com a tela na tensão de 27,58 MPa. Isso difere um pouco da figura 131, onde percebe-se o início do deslocamento radial do ponto 01 (azul – horizontal) a 13,79 MPa e a 20,68 MPa no ponto 02 (vermelho – vertical). O fato de o modelo utilizado ser de natureza contínua e não considerar a natureza discreta da produção de sólidos, pode não reproduzir de forma fiel os detritos originados da formação, explicando a diferença nos resultados.

No entanto, o comportamento da tela tanto para o modelo numérico quanto para o experimental foram bastante semelhantes, apresentando as mesmas tendências. Como as tensões utilizadas no modelo numérico foram além das utilizadas no experimento, até 34,47 MPa, o modelo pode ser validado. Conclui-se que, para fins de engenharia, o programa consegue reproduzir bem o comportamento do sistema formação-tela.

A figura 133 apresenta os resultados das deformações obtidos experimentalmente. As medições de deslocamento e deformação foram feitas em blocos diferentes, logo, observa-se que os níveis de tensão atingidos para deformação (48,26 MPa) foram maiores do que os atingidos para o deslocamento (34,47 MPa – figura 131).

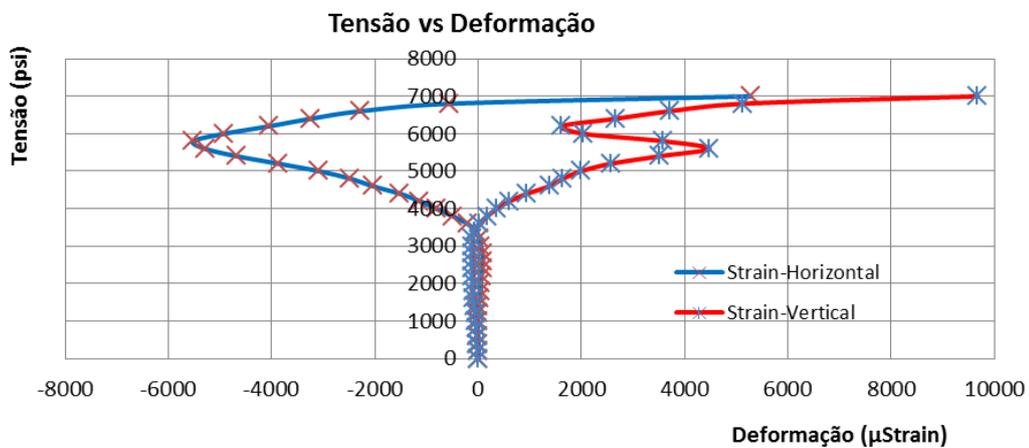


Figura 133 – Tensão X Deformação por Chavez (2011).

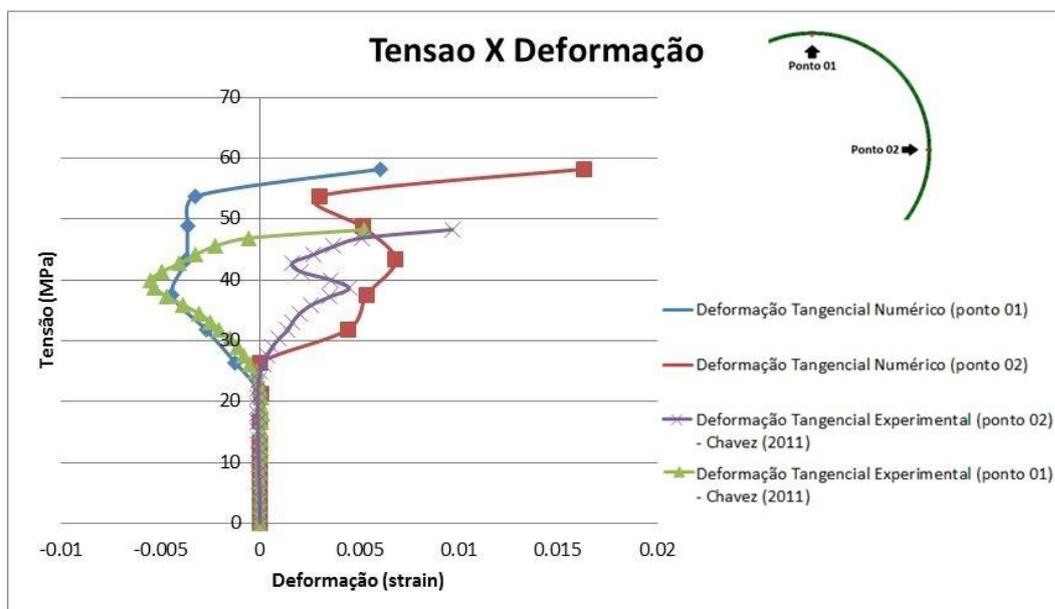


Figura 134 – Tensões verticais aplicadas e deformações tangenciais nos pontos 01 e 02 (resultados experimentais e obtidos numericamente na condição *stand alone*).

A figura 134 mostra a comparação entre os resultados das deformações obtidos experimentalmente e numericamente. Os resultados numéricos apresentaram a mesma tendência dos valores obtidos no modelo físico, ou seja, o ponto 01 (figura 101) sofreu extensão e depois começou a sofrer contração, enquanto o ponto 02 sofreu apenas contração.

5.3.

Comparação dos Resultados dos Ensaio na Condição de Tela Centralizada e Encostada

Neste item, os resultados obtidos numericamente para os modelos na condição de tela centralizada e encostada serão comparados e analisados.

A figura 135 mostra a comparação entre os deslocamentos radiais na tela centralizada e encostada. Observa-se que o deslocamento radial do ponto 01 da tela centralizada é menor do que na tela encostada, no entanto, o deslocamento radial no ponto 02 da tela centralizada é bastante parecido com o da encostada. O fato do deslocamento radial no ponto 01 ser maior para a tela encostada se deve ao contato formação-tela, que transmite diretamente os esforços, uma vez que o *gravel* suporta as tensões de confinamento do modelo.

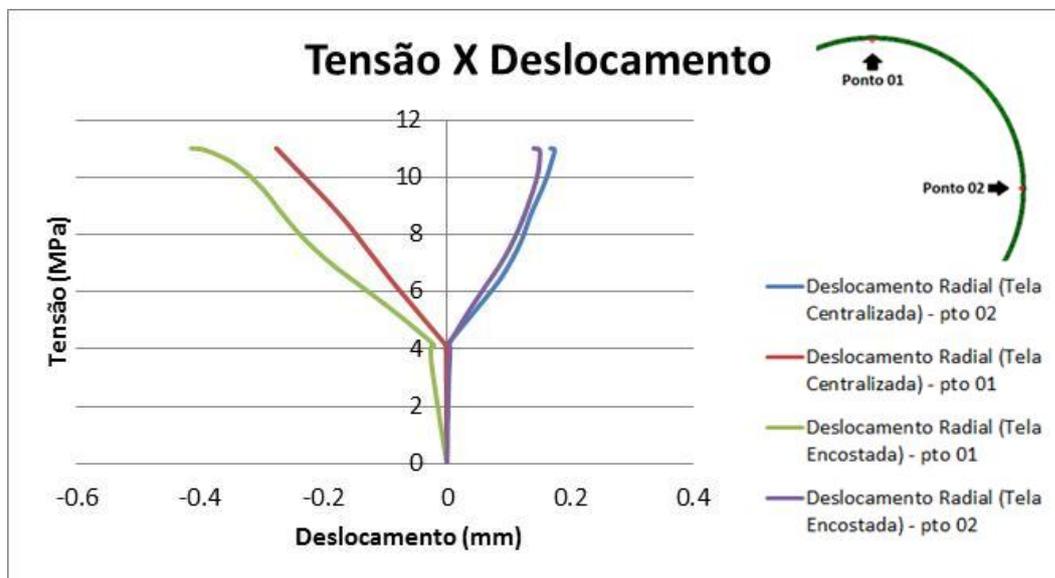


Figura 135 – Tensões verticais aplicadas e deslocamentos radiais nos pontos 01 e 02 (comparação dos resultados obtidos numericamente na condição de tela centralizada e encostada).

Da mesma forma, a figura 136 apresenta a comparação entre as deformações tangenciais para a tela centralizada e encostada. Os resultados, apesar de próximos, mostram que a tela centralizada apresenta maiores

deformações nos pontos analisados do que a tela encostada. Apesar disso, os resultados finais para os dois modelos foram muito similares.

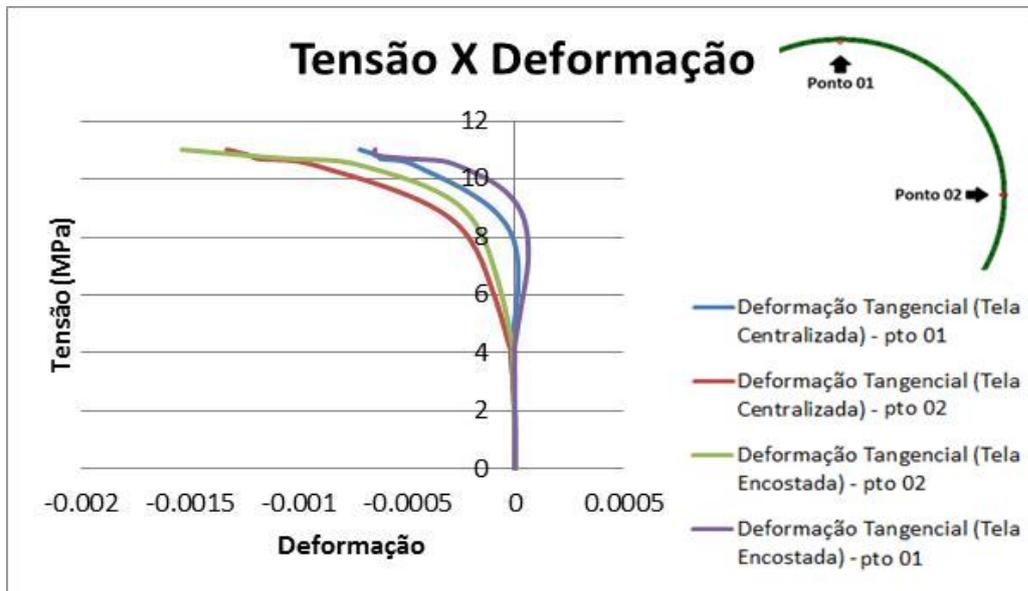


Figura 136 – Tensões verticais aplicadas e deformações tangenciais nos pontos 01 e 02 (comparação dos resultados obtidos numericamente na condição de tela centralizada e encostada).

Com a validação dos modelos da tela centralizada e encostada, é interessante analisar o comportamento das tensões atuantes na tela. Para isso, a figura 137 apresenta a variação da tensão principal máxima de cada modelo de acordo com a aplicação do carregamento. Por coincidência, o ponto 01 foi o local onde foi observado o maior valor da tensão principal maior no final da aplicação do carregamento (tensão vertical) nos dois modelos.

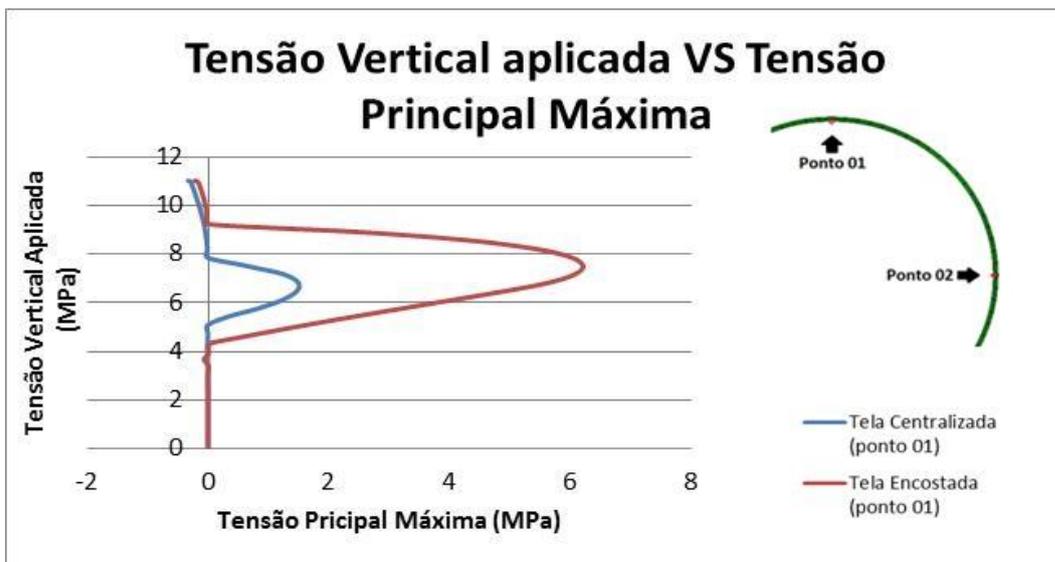


Figura 137 – Tensões verticais aplicadas e tensão principal máxima no ponto 01 (comparação dos resultados obtidos numericamente na condição de tela centralizada e encostada).

De acordo com a figura 137, nota-se que em 6,89 MPa (tensão vertical aplicada), a tela encostada chega a valores quatro vezes maiores de tensão principal maior do que na tela centralizada (tela centralizada – 1,5 MPa; tela encostada – 5,63 MPa). No entanto, a tela centralizada acaba sofrendo maiores tensões de compressão no final da simulação, apesar desses valores serem muito próximos dos obtidos na simulação da tela encostada.